Math. A.
127 l 2n

Math. A. 127 ln

Kiel

Bayerische Staatsbibliothek
<36645110990015

# Das Gesetz

der

# Proportionalen Widerstände

## und seine Anwendungen.

Nebst Versuchen

über das Verhalten verschiedener Materialien bei gleichen Formänderungen
sowohl unter der Presse als dem Schlagwerk.

Von

**Friedrich Kick,**

k. k. Regierungsrath und ordentlichem öffentlichen Professor der mechanischen Technologie
an der k. k. deutschen technischen Hochschule in Prag.

*Mit 3 lithographirten Tafeln und 44 Holzschnitten.*

**Leipzig.**

Verlag von Arthur Felix.

1885.

H

BIBLIOTHECA
REGIA
MONACENSIS

Dem

Anreger und einstimmig gewählten Präsidenten

der

**Münchner Conferenz zur Vereinbarung einheitlicher Untersuchungsmethoden bei der Prüfung von Bau- und Constructions-Materialien auf ihre mechanischen Eigenschaften**

# Herrn Professor J. Bauschinger

widmet diese Schrift

als einen Beitrag zu den Arbeiten der gewählten Commission

in collegialer Verehrung

das Commissions-Mitglied

**Friedr. Kick.**

# Vorwort.

Diese Schrift enthält die geordneten und gesichteten Ergebnisse meiner zahlreichen, in den letzten acht Jahren durchgeführten Versuche, welche zu dem Zwecke unternommen wurden, eine Mechanik der Formänderungen anzubahnen. Das wichtigste, bereits 1879 veröffentlichte Ergebniss ist die Auffindung des Gesetzes der proportionalen Widerstände, eines Naturgesetzes, welches einerseits die rechnungsmässige Verwerthung von Versuchen mit kleinen Probestücken zur Lösung zahlreicher Fragen der Praxis gestattet, andererseits vielfache Folgerungen in Bezug auf die Festigkeitslehre und auf technologische Processe zulässt. Dementsprechend enthält diese Arbeit die Anwendungen auf das Sprengen, die Berstungsfestigkeit, auf Zug, Druck, Biegung und Torsion, auf Theilungsarbeiten, das Abtrennen von Spänen, das Abscheeren und Lochen, das Schmieden, Durchschiessen, Walzen, Ziehen und Pressen.

Das alte Axiom der Sprengtechnik, das Aehnlichkeitsgesetz von Vicat, bereits 1833 für Druckfestigkeit aufgestellt, endlich das von Barba 1880 für Zugfestigkeit geometrisch ähnlicher Probestücke gleichen Materials ausgesprochene Gesetz sind specielle Fälle des Gesetzes der proportionalen Widerstände und ergeben sich als einfache Folgerungen desselben, wenn man es auf das Sprengen, die Druck- und die Zugfestigkeit anwendet.

Das Zusammenfallen einfacher Folgerungen aus dem Gesetze mit den selbständig für die genannten Specialfälle durch Lebrun, Vicat und Barba gefundenen Regeln kann gewiss als eine schöne Bestätigung des Gesetzes betrachtet werden. Diese Bestätigung hatte für mich um so mehr Beweiskraft, als ich die Arbeiten der Genannten erst kennen lernte, nachdem ich das Gesetz ausgesprochen hatte; bei Barba's Arbeiten musste dies so sein, da dieselben spätere waren. Wenn Vicat für andere Fälle, und zwar für Formänderungen weicher Massen, zu abweichenden Resultaten gelangte, so hat dies seinen Grund nur darin, dass Experimente

über Formänderungen durch vielfache Fehlerquellen beeinflusst sind und dass die kritische Beurtheilung der Versuchsergebnisse den Umfang und den Einfluss jener möglichst scharf ins Auge fassen muss, was hierbei versäumt wurde.

Die Mehrzahl der in dieser Schrift besprochenen Versuche fanden im technologischen Laboratorium statt, einige jedoch in der Waggonfabrik des Herrn Baron v. Ringhoffer, für deren Gestattung und Förderung der höflichste Dank, insbesondere dem Herrn Betriebsdirector Wenzel Eckerth, ausgesprochen sei; desgleichen bin ich meinem Herrn Collegen Professor Heinrich Gollner zu Dank verpflichtet für die Theilnahme an der Durchführung exacter Druckversuche mittels seiner Festigkeitsmaschine. Anderweitige freundliche Förderung ist an entsprechender Stelle in den nachfolgenden Blättern dankend erwähnt.

Weil das Gesetz der proportionalen Widerstände das wichtigste Ergebniss ist, so bestimmte dasselbe den Titel dieser Schrift, obwohl in derselben auch eine Reihe von Fragen ihre Bearbeitung finden, welche mit demselben in zweiter Reihe zusammenhängen und zu deren Beantwortung es anregt. Es gehören hierher die Beziehungen der Widerstände geometrisch congruenter Probestücke verschiedenen Materiales bei den gleichen Formänderungen und der Einfluss der Geschwindigkeit, mit welcher Formveränderungen bewerkstelligt werden, auf den Widerstand.

Diese beiden wichtigen Fragen gaben wieder zu Nebenfragen über Dichtenänderungen, das Fliessen spröder Körper u. a. Veranlassung, und ich hoffe, dass der VI. Abschnitt, welcher diese Fragen geordnet vorführt, gleichfalls das Interesse der Fachgenossen erwecken wird, obwohl namentlich die Frage über den Einfluss der Geschwindigkeit auf den Widerstand eine negative Lösung insoferne findet, als gezeigt wird, dass diese Aufgabe nicht eine für alle Materialien gleichartige Beantwortung zulässt, weil die Natur der verschiedenen Materialien in Beziehung auf ihren Aggregatzustand eine verschiedene ist. So gibt es z. B. Körper, wie plastischen Thon u. a., in welchen enthaltene Flüssigkeiten und Gase eine wichtige Rolle spielen, so zwar, dass in den mehr und weniger gepressten Theilen andere Mengungsverhältnisse auftreten können, wenn die Beanspruchung eine langsame ist, als dann, wenn diese rasch z. B. durch einen Stoss erfolgt. Das Verhältniss der Arbeitsgrösse bei Formänderung durch ruhigen Druck zu jener bei Anwendung von Schlägen wird hierdurch beeinflusst und die Aufstellung allgemeiner Beziehungen zwischen beiden ist unmöglich gemacht.

Bei der im Laufe dieses Jahres durch Professor Bauschinger angeregten und geleiteten Conferenz zur Ermittlung einheitlicher mechani-

scher Prüfungsmethoden der Bau- und Constructions-Materialien zeigte es sich so recht auffällig, wie zahlreich die Fragen, welche noch der Erledigung harren und wie verschieden die Meinungen über manche derselben sind. Wäre auch durch jene Berathung nicht manche Detailfrage gelöst und wären andere in bestimmter Abgrenzung nicht aufgestellt worden, schon die Anregung zu gemeinsamem, zielbewusstem Vorgange müsste sich der dankenden Anerkennung der Fachgenossen erfreuen, und in dieser Erwägung ist diese Schrift dem verehrten, hochverdienten Collegen gewidmet. Es ist nur schrittweise möglich, sich in den mechanischen Fragen der Formänderungen der Wahrheit zu nähern, und wenn ich hoffe, dass die vorliegende Arbeit als ein solcher Schritt nach vorwärts bezeichnet werden darf, so stützt sich diese Hoffnung auf die Erkenntniss, dass das Gesetz der proportionalen Widerstände zur leichteren und bestimmteren Lösung noch mancher Fragen der Festigkeitslehre, sowie der technischen Praxis dienen wird. Möge diese Schrift freundliche und nachsichtige Aufnahme finden und möge sie zu weiterer Pflege des technologischen Experimentes anregen; denn nur der vereinten Forschung wird es gelingen, die mechanische Technologie auf der sicheren Grundlage einer Mechanik der Formänderungen aufzubauen.

Prag, im November 1884.

**Friedr. Kick.**

# Inhalts-Verzeichniss.

## I. Abschnitt.


Seite

**Formulirung und Erläuterung des Gesetzes der proportionalen Widerstände** . . . . . 1
Brucharbeit, Bruchfactor . . . . . 5
Bruchhöhe . . . . . 6


## II. Abschnitt.


**Anwendungen des Gesetzes der proportionalen Widerstände** . . . . . 8
Das Sprengen . . . . . 8
Berstungsfestigkeit. Röhren unter innerem oder äusserem Drucke . . . . 11
Zugfestigkeit . . . . . 12
Druckfestigkeit . . . . . 12
Biegung von Stäben . . . . . 13
Torsion . . . . . 13
Knickungsfestigkeit . . . . . 13
Zerschlagen, Zerstampfen, Zerdrücken, Pulverisiren . . . . . 14
Abtrennen von Spänen . . . . . 17
Abscheeren und Lochen . . . . . 21
Schmieden unter dem Dampfhammer . . . . . 25
Werkzeugmaschinen, Pressen, Prägwerke . . . . . 26
Dimensionirung von Panzerplatten . . . . . 26
Walzen und Drahtziehen . . . . . 27
Das Auspressen weicher Massen aus Gefässöffnungen . . . . . 31


## III. Abschnitt.


**Theoretische Begründung des Gesetzes der proportionalen Widerstände** . . . . . 33


## IV. Abschnitt.


**Ueber die experimentelle Auffindung des Gesetzes und hierbei gemachte Erfahrungen** . . 38


## V. Abschnitt.


**Begründung des Gesetzes der proportionalen Widerstände durch das Experiment** . . . 43
1. Druckprobe. Zusammendrückung zweier geometrisch ähnlicher Cylinder aus bildsamer Porzellanmasse zwischen horizontalen Platten . . . . 43
2. Zusammendrückung geometrisch ähnlicher Cylinder aus plastischer Masse zwischen Metallcylinderpaaren, deren Durchmesser im selben Grundverhältnisse standen, unter steter Wegnahme des ausgepressten Materiales 45
3. Zusammendrückung geometrisch ähnlicher Kupfercylinder zwischen parallelen Platten . . . . . 47
4. Versuche über Druckfestigkeit geometrisch ähnlicher Prismen, Cylinder etc. aus Stein, Gyps u. dgl. . . . . 48
Vicat's Aehnlichkeitsgesetz . . . . . 48

Seite

5. Versuche über Zugfestigkeit geometrisch ähnlicher Stahlcylinder . . . 51
Barba's Aehnlichkeitsgesetz . . . . . 51
6. Schlagversuche mit geometrisch ähnlichen Kupfercylindern . . . . . 52
7. Schlagversuche mit Stein-, Masse- und Gusseisenkugeln . . . . . 56
8. Schlagversuche mit geometrisch ähnlichen Glascylindern . . . . . 59
9. Versuche über das Abscheeren und Lochen von Metallen . . . . . 60
10. Sprengen von Cementmassen durch Wasserdruck . . . . . 67
11. Walzversuche . . . . . 69
12. Reibungsarbeit . . . . . 70
13. Sanddruck-Versuche . . . . . 71
14. Elastische Deformation von tropfbar flüssigen und ausdehnsam flüssigen Körpern . . . . . 73

VI. Abschnitt.

**Ueber das Verhalten verschiedener Materialien bei gleicher Einwirkung äusserer Kräfte auf congruente Probestücke und über den Einfluss der Geschwindigkeit der Formänderung auf den Widerstand oder die Beziehungen von Druck und Stoss . . . . . 75**
Das Fliessen fester Körper (Treska) . . . . . 75
Das Fliessen spröder Körper . . . . . 76
Beiläufiges Verhältniss der Arbeitswiderstände einiger Materialien bei Druckproben, bezogen auf gleiche Volumen, und bei Zugproben, bezogen auf gleiche Gewichte . . . . . 79, 80
Von den Volumsänderungen bei Formänderungen (Versuche mit Blei, Kupfer und Kautschuk) . . . . . 81
Ueber den Einfluss der Geschwindigkeit bezw. der Zeit . . . . . 87
Von der Einwirkung vieler schwacher Schläge . . . . . 91
Ueber das verschiedene Verhalten mancher Materialien bei Einwirkung von Druck und Stoss (Guttapercha) . . . . . 95
Vergleich der Arbeitsgrössen für dieselbe Formänderung bei Anwendung von ruhigem Druck und von Schlägen . . . . . 96—113
Das ballistische Schlagwerk . . . . . 101
Untersuchungen der Schlagdauer . . . . . 103
Ruckweise Formänderung . . . . . 113

Anhang.

1. Schlagwerke . . . . . 114
2. Dynamometrische Presse . . . . . 115

Register . . . . . 117

I. Abschnitt.

# Formulirung und Erläuterung des Gesetzes der proportionalen Widerstände.

Werden zwei geometrisch ähnliche Körper derselben materiellen Beschaffenheit gleichzeitig unter gleichartiger Einwirkung äusserer Kräfte in der Weise deformirt, dass sie, wie auch ihre Gestalt verändert werden mag, stets einander geometrisch ähnlich bleiben, so findet eine einfache Beziehung zwischen den Volumen dieser Körper und den zur Formänderung erforderlichen Arbeitsgrössen statt. Es verhalten sich nämlich diese Arbeitsgrössen wie die Volumen der beiden Körper.

Indem die Volumen von Körpern gleicher Materie proportional den Gewichten sind, lässt sich das Gesetz in folgende Form bringen:

1) Die Arbeitsgrössen, welche zu übereinstimmender Formänderung zweier geometrisch ähnlicher und materiell gleicher Körper erfordert werden, verhalten sich wie die Volumen oder Gewichte dieser Körper.

Hierbei ist unter übereinstimmender Formänderung jene verstanden, welche zwei Körper geometrisch ähnlicher Anfangsform zu eben solcher Endform führt, und dies annähernd mit gleicher Geschwindigkeit und unter gleichartiger Einwirkung äusserer Kräfte.

Bezeichnet man die Arbeitsgrössen mit $A$ und $A_1$, die Volumen mit $V$ und $V_1$, die Gewichte mit $G$ und $G_1$ und das Verhältniss der correspondirenden linearen Dimensionen beider Vergleichskörper mit $1 : a$, welches Verhältniss wir in der Folge kurz das Grundverhältniss nennen, so drückt sich das Gesetz durch folgende Proportionen aus:

$$A : A_1 = V : V_1 = G : G_1 = 1 : a^3 \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad (1)$$

Für solche Formänderungen, bei welchen man die Pressungen oder Drucke misst, ist die Gleichung (1) zur unmittelbaren Anwendung nicht wohl geeignet; hiefür empfiehlt es sich, das Gesetz der proportionalen Widerstände in etwas anderer Fassung zu geben. Zu derselben gelangt man leicht, wenn auf die Differentiale der Formänderung übergegangen wird. Es werde in einem bestimmten Zeittheilchen (Zeitdifferential) zur Formänderung des einen Körpers das Arbeitsdifferential $dA$, des anderen $dA_1$ erfordert. — Arbeit ist bekanntlich Kraft mal Weg; hier

also der innerhalb der ausserordentlich kleinen Zeit als constant anzunehmende Druck $P$, beziehungsweise $P_1$, mal dem Wege $ds$, beziehungsweise $ds_1$. Demnach ist $dA = Pds$ und $dA_1 = P_1 ds_1$.

Nun ist nach dem Vorhergehenden $dA : dA_1 = 1 : a^3$, weil beide Körper sowohl zu Beginn als am Ende des Zeitdifferentiales der Voraussetzung nach einander geometrisch ähnlich sind.

Die Wegdifferentiale $ds$ und $ds_1$ stehen aus eben diesem Grunde gleichfalls im Grundverhältnisse $1 : a$. Demnach haben wir:

$$Pds : P_1 ds_1 = 1 : a^3,$$
$$ds : ds_1 = 1 : a,$$

woraus folgt

$$P : P_1 = 1 : a^2 = F : F_1 = O : O_1 \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad (2),$$

wobei unter $F$ und $F_1$ correspondirende Querschnittsflächen, unter $O$ und $O_1$ die Oberflächen beider Versuchskörper verstanden sind.

Diese Gleichung gibt das Gesetz in folgender Form:

2) Die Drucke oder Pressungen, welche zur übereinstimmenden Formänderung zweier geometrisch ähnlichen und materiell gleichen Körper erfordert werden, verhalten sich wie die correspondirenden Querschnitte oder die Oberflächen der gepressten Körper.

Bevor wir zu einer dritten, auch häufig bequem verwendbaren Formulirung des Gesetzes der proportionalen Widerstände übergehen, seien beide im Wesen identische Regeln auf Beispiele angewendet.

Ein Kupfercylinder $C_1$, 6,5 mm hoch, 5 mm im Durchmesser, von 1,2 g Gewicht bedarf zum Zusammenschlagen auf 2,6 mm Höhe im kalten Zustande einer Schlagarbeit von 5,4 mkg.

Fig. 1.

Welcher Schlagarbeit bedarf ein Kupfercylinder von 65 mm Höhe, 50 mm Durchmesser und 1200 g Gewicht? Das Verhältniss der linearen Dimensionen beträgt 1 : 10, daher $A : A_1 = 1 : a^3$ und die Werthe eingesetzt $5{,}4 : A_1 = 1 : 1000$ gibt $A_1 = 5400$ mkg.

Da die Formänderung unter annähernd gleichen Geschwindigkeiten zu erfolgen hat, so sind in beiden Fällen die Fallhöhen des Hammers als gleich vorausgesetzt. Nehmen wir sie zu 1 m an, so beträgt das Hammergewicht im ersten Falle 5,4 kg, im zweiten 5400 kg.

Zu ganz demselben Resultate gelangt man auch, wenn statt des Grundverhältnisses die Gewichte in Rechnung gestellt werden.

$$A : A_1 = G : G_1,$$
$$5{,}4 : A_1 = 1{,}2 : 1200, \quad A_1 = 5400 \text{ mkg}.$$

Es verdient bemerkt zu werden, dass das Verhältniss der Gewichte sich viel leichter genau bestimmen lässt als das Verhältniss der linearen Dimensionen oder das Grundverhältniss, und dass es daher gewöhnlich am zweckmässigsten ist, die Gewichte durch Wägung zu ermitteln und in die Rechnung einzusetzen.

In Bezug auf die Geschwindigkeiten muss bemerkt werden, dass kleine Differenzen derselben keinen merklichen Einfluss üben.

Es wird hiervon in einem gesonderten Abschnitte noch näher gesprochen werden, doch kann schon hier bemerkt werden, dass es keinen merklichen Unterschied macht, ob eine bestimmte Schlagarbeit $A$ durch $Q \,.\, h$ oder $\frac{Q}{2} \,.\, 2h$ gegeben ist und daher das gleiche Resultat auch durch ein Hammergewicht von 2700 kg durch 2 m Fallhöhe erzielt werden kann.

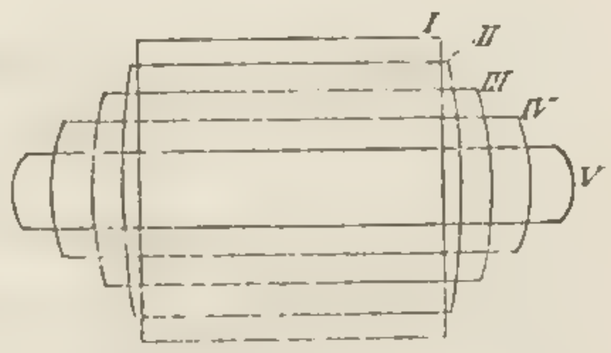
Von weit massgebenderem Einflusse sind die Ungleichförmigkeiten im Materiale selbst. Im Allgemeinen sind in Materialien, welche sich in Form grosser Stücke befinden, mehr Hohlräume und poröse Stellen als in Materialien, die bereits durch Bearbeitung, bei welcher ein Fluss der Massentheilchen, wie beim Walzen, Ziehen u. dgl. erfolgte, auf kleinere Dimensionen gebracht sind. Wollte man den obbezeichneten kleinen Kupfercylinder aus Kupferdraht, den grösseren aus einer überschmiedeten Kupferbarre herstellen, so wären beide Stücke durchaus nicht als gleiches Material zu betrachten. Man muss vielmehr das kleine Stück durch Abdrehen aus dem Materiale des grossen herstellen, dieses aber durch genügende Vorbereitung thunlichst homogen machen.

Gehen wir nun zum Falle einer Formänderung durch Druck über. Ein Kupfercylinder von 18 mm Höhe und 18 mm Durchmesser werde durch allmälig wachsenden Druck der Höhe nach zusammengedrückt. Fig. 2 deutet die allmälige Formänderung an. Der

| | | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|
| Deformationsform | II | entspricht | der | Druck | von | 9000 kg |
| jener | III | „ | „ | „ | „ | 16000 „ |
| „ | IV | „ | „ | „ | „ | 28950 „ |
| „ | V | „ | „ | „ | „ | 48500 „ |

Trägt man sich die Höhenabnahmen (Wege) viermal vergrössert als Abscissen und die zugehörigen Pressungen als Ordinaten auf, so erhält man die Linie $A$ des Diagramms Fig. 1, Taf. I, in welchem die Fläche 0, 1, 2, 3 . . . $A$ . . . $SR$, wie dies bekannt ist, die zur Formänderung aufgewendete mechanische Arbeit darstellt. Ein Quadratcentimeter dieser Fläche entspricht 6,25 mkg Arbeit.*)

Fig. 2.




Deformationsformen eines Cylinders aus Kupfer nat. Gr.

Für praktische Zwecke genügt es gewöhnlich, jene Pressung (Druck) zu bestimmen, bei welcher eine bestimmte Deformation erfolgt. Betrachten wir z. B. die Deformationsform V (Fig. 2 und 3), so war für dieselbe der Druck von 48500 kg erforderlich. Wir haben nicht nöthig, zur Bestimmung des Maximaldruckes, welcher erforderlich ist, ein linear 5mal grösseres, geometrisch ähnliches Probe-

*) Die übrigen Angaben dieses Diagramms finden später ihre Besprechung.

stück gleicher Masse übereinstimmend zu deformiren, die Arbeitsgrössen in Beziehung zu einander zu bringen, sondern wir können uns der Formel (2) bedienen, welche das Verhältniss der Pressungen bestimmt.

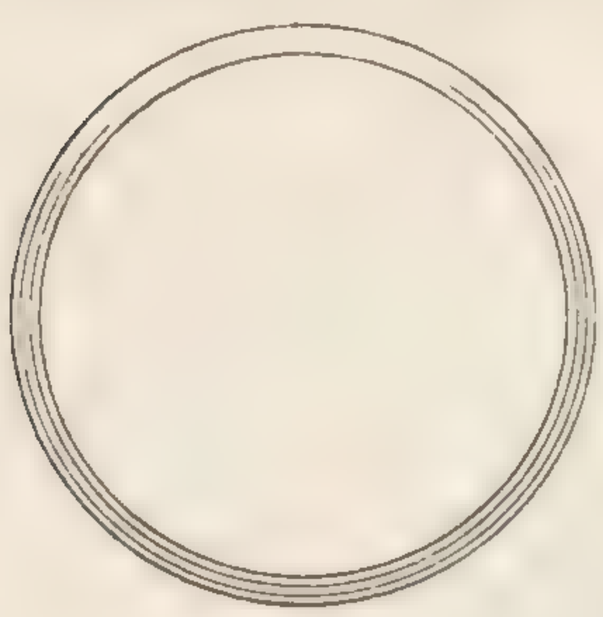
$$P : P_1 = 1 : a^2,$$

mithin im gegebenen Falle

$48500 : P_1 = 1 : 25$, gibt $P_1 : 1\,212\,500$ kg.

Es ist mithin zur übereinstimmenden Formänderung des linear 5mal grösseren Stückes eine 25mal grössere Maximalpressung erforderlich. In diesem Falle ist es minder bequem, die Gewichte der Probestücke in die Rechnung zu stellen, obwohl dies auch anginge, denn es ist

Fig. 3.



$$P : P_1 = 1 : \left(\frac{G_1}{G}\right)^{2/3}, \text{ weil } \frac{1}{a^3} = \frac{G_1}{G},$$

$$\text{daher } \frac{1}{a} = \sqrt[3]{\frac{G_1}{G}} \text{ und } \frac{1}{a^2} = \left(\frac{G_1}{G}\right)^{2/3}.$$

Zu einer dritten Form des Gesetzes gelangt man durch folgende Betrachtung. Es unterliegt keinem Anstande, einem der Vergleichskörper durch entsprechende Bearbeitung das Gewicht von 1 kg zu geben. Dann ist $G = 1$ und die Gleichung (1) geht über in

$$A : A_1 = G : 1 \text{ oder } A = A_1\ G \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad (3),$$

in welcher Gleichung $A_1$ die zur übereinstimmenden Formänderung oder Theilung des Probestückes von 1 kg Gewicht erforderliche Arbeitsgrösse bedeutet. In Worten gibt dies eine dritte Formulirung des Gesetzes, lautend:

> 3) Körper bestimmten Materiales und bestimmter Form bedürfen zu einer bestimmten Formänderung oder Theilung einer Arbeitsgrösse, welche gleich ist dem Producte aus dem Körpergewichte und der für die Gewichtseinheit desselben Materiales bei geometrisch ähnlicher Grundform und übereinstimmender Formänderung oder Theilung benöthigten Arbeitsgrösse.

Es bedarf kaum der Erwähnung, dass die Arbeitsgrösse $A_1$ auch rechnungsmässig aus jener Arbeitsgrösse $A$ ermittelt werden kann, welche versuchsweise für irgend ein Probestück vom Gewichte $G$ gefunden wurde. Aus (3) folgt ja auch $A_1 = \frac{A}{G}$, und $A_1$ ist bestimmt, wenn für einen concreten Fall $A$ und $G$ ermittelt wurde.

Die unter (3) gegebene Form des Gesetzes der proportionalen Widerstände ist besonders anwendbar zur Berechnung gewisser Theilungsarbeiten bei spröden Körpern und führt hierbei zu ebenso einfachen als schönen Beziehungen.

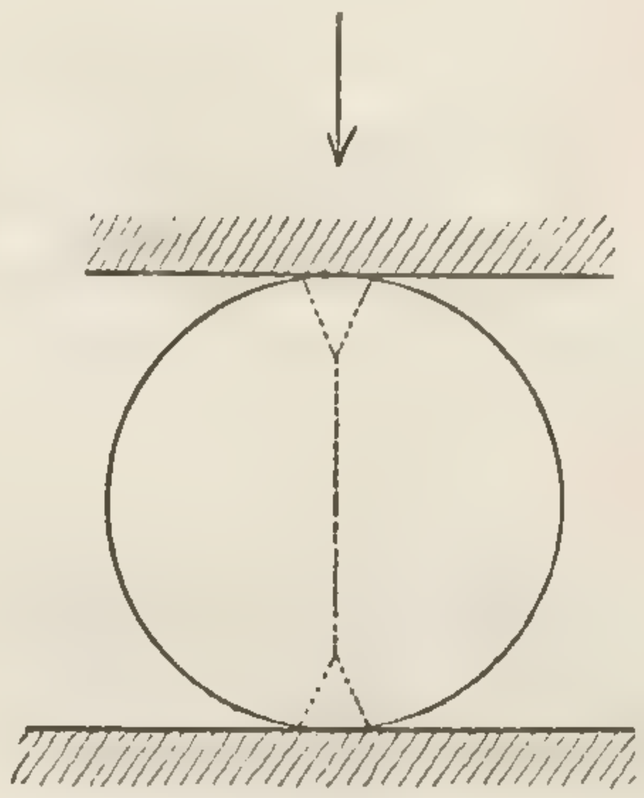
Angenommen, es sollen Kugeln gleichen Materiales aber verschiedener Grösse durch Schläge zerkleinert werden; jede der Kugeln werde durch einen Schlag, gerade kräftig genug, um einen Bruch herbeizuführen, getheilt: so ist die hierzu erforderliche Gesammtarbeit gleich dem Gewichte sämmtlicher Kugeln, ausgedrückt in Kilogrammen, mal der zur Theilung einer Kugel von 1 kg Gewicht erforderlichen Arbeit.

Die auf 1 kg bezogene Brucharbeit, Bruchfactor genannt, beträgt bei feinkörnigem grauen Gusseisen in Kugelform ca. 200 mkg. Soll nun die Arbeitsgrösse für die Theilung einer Kugel von z. B. 5 kg bestimmt werden, so findet man nach (3) $A = 5 \,.\, 200$ mkg $= 1000$ mkg, und dieselbe Arbeitsgrösse genügt auch für die Theilung beliebig vieler Gusseisenkugeln, welche zusammen 5 kg wiegen.

Nun dürfte sich dem Leser der Einwand aufdrängen, dass es wohl möglich sein müsse, eine und dieselbe Kugel durch sehr verschieden wuchtige Schläge zum Bruch zu bringen, ja er wird sagen, bei einem stärkeren Schlage werde sie um so gewisser brechen.

Dies ist natürlich richtig, aber doch lässt sich mit ziemlichem Grade der Genauigkeit jene Arbeitsgrösse feststellen, bei welcher die elastische Reaction überschritten wird und ein Bruch auftritt.

Fig. 4.

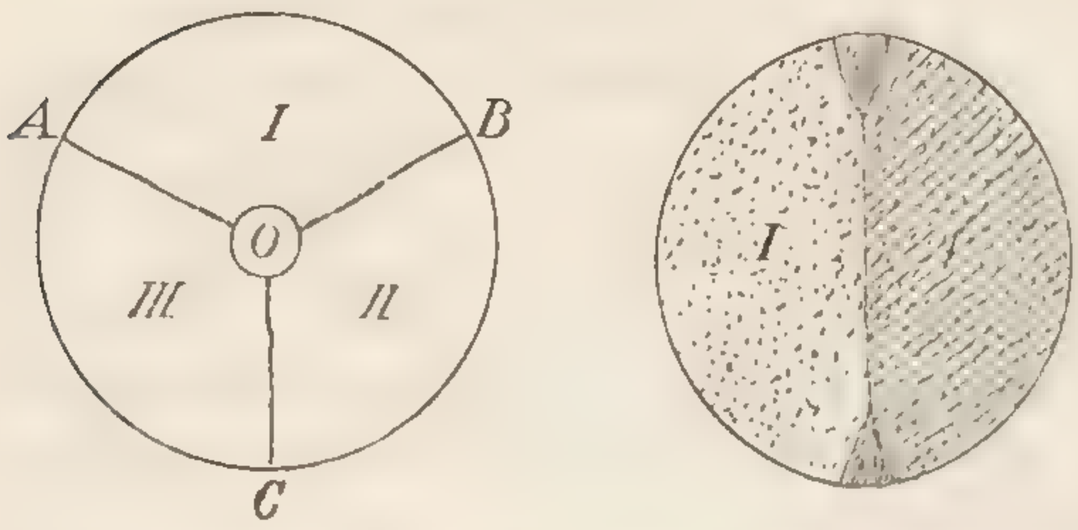


Die Kugel ruhe auf einer harten Unterlage und werde von der Bahn des gleichfalls harten, vertical geführten Hammers getroffen. (Fig. 4.) Es entsteht nach Ueberschreiten der elastischen Reaction oben und unten eine bleibende Abplattung, und auf dieser bauen sich zwei kleine Kegel (Fig. 4) auf, welche, indem sie gegen einander getrieben werden, die Kugel endlich zersprengen. Dieses Zersprengen sollte nach einem grössten Kreise stattfinden. Wegen der natürlichen Unvollkommenheiten des Materiales sind aber die schwächsten Stellen gewöhnlich in irgend zwei sich nicht zur Ebene ergänzenden Halbkreisflächen, es findet daher zunächst das Auftreten der Risse nach $OA$ und $OB$ (Fig. 5) und hierauf erst durch Nachwirkung des Schlagklotzes und tieferes Eintreiben der Kegel die Bildung des secundären Sprunges $OC$ statt, so dass schliesslich eine Dreitheilung der Kugel die Folge ist. Ist der Schlag zu wuchtig, so findet, bevor noch die Bruchstücke Zeit finden, zur Seite zu fliegen, eine weitere Zerkleinerung derselben statt, welche dann eine Regelmässigkeit schwer mehr erkennen lässt.

Je gleichförmiger und feinkörniger das Material der Kugel ist, um so überraschender erfolgt fast ausschliesslich der Dreibruch.

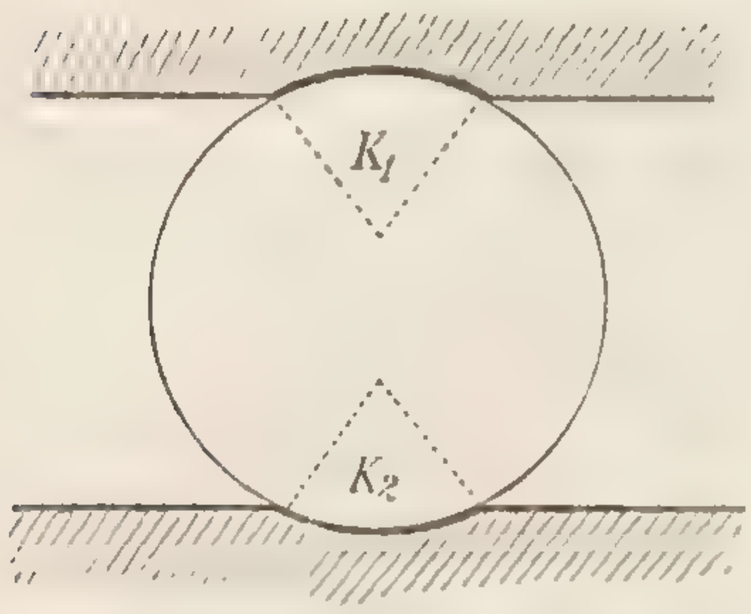
Wie später bei näherer Besprechung der Versuche noch ausführlicher dargelegt werden wird, kommt demselben Materiale bei jeder bestimmten Form ein anderer Bruchfactor zu. Der Bruchfactor ist daher nicht nur abhängig von dem Materiale, sondern auch von der Form des Werkstückes. Ja noch mehr. Auch die Form des zur Theilung verwendeten Werkzeuges ist von Einfluss. Hat z. B. Ambos und Hammer zur Kugel passende Grübchen, dann bauen sich auf diesen die Materialkegel $K_1$ $K_2$ auf; diese Kegel sind grösser, der Bruch erfolgt nun schwieriger. (Fig. 6.) Der Dreibruch der Kugeln aus körniger Masse zeigt sich ebenso beim Zerdrücken, und hierbei kann man durch Beilagen aus Pappe, in welche sich die Kugel beim Zerdrücken selbst die Grübchen bildet, den Widerstand derselben gegen Bruch merklich erhöhen.

Fig. 5.




Ansicht von oben. Ansicht des Bruchstückes I von vorn.

Fig. 6.




Wir haben im Vorstehenden gesehen, wie bequem man mit Hilfe des ermittelten Bruchfactors die Theilungsarbeit eines bekannten Gewichtes verschieden grosser, geometrisch ähnlicher Stücke gleichen Materiales bestimmen kann.

Der Bruchfactor steht aber noch in einer anderen sehr hübschen und einfachen Beziehung; er ist nämlich gleich jener in Metern ausgedrückten Fallhöhe, durch welche die Kugeln fallen müssen, um auf einer festen Unterlage zum Bruch zu kommen. Diese Fallhöhe kann als Bruchhöhe bezeichnet werden.

Bruchfactor mal Körpergewicht und Bruchhöhe mal Körpergewicht sind einander gleich und drücken die zum Bruche erforderliche Arbeitsgrösse aus. Diese Beziehung erklärt sich einfach durch folgende Betrachtung.

Nach dem Satze (3) ist die zu einer bestimmten Formänderung oder Theilung erforderliche Arbeitsgrösse proportional dem Gewichte. Ist sie für einen Körper (Kugel) von 1 kg Gewicht $A_1$, so ist sie für einen

geometrisch ähnlichen, gleichartig beanspruchten Körper (Kugel) von 2 kg gleich $2\,A_1$ und einen von $n$ kg gleich $n\,A_1$ mkg.

Fallen nun Kugeln gleichartiger Masse von 1 kg, 2 kg, . . . $n$ kg Gewicht durch dieselbe Fallhöhe $H$, so wird die lebendige Kraft, mit welcher sie unten anlangen, $H$ . 1 kg, $H$ . 2 kg, . . . $H^m$ . $n$ kg sein. Setzt man nun für den Bruch

$$Hn \text{ mkg} = n\,A_1 \text{ mkg},$$

so folgt

$$H = A,$$

oder die in Metern ausgedrückte Fallhöhe (Bruchhöhe genannt) ist gleich der in mkg gemessenen Brucharbeit für eine Kugel von 1 kg (Bruchfactor).

Man ersieht hieraus, dass sich der Bruchfactor aus der Bruchhöhe und umgekehrt bestimmen lässt.

Die Art, wie der Bruch einer Kugel beim Auffallen erfolgt, ist ähnlich jener beim Zerschlagen; doch statt zweier das Material auseinandertreibender kleiner Kegel tritt hier nur einer auf. Aus diesem Grunde ist es a priori nicht feststehend, dass die Arbeitsgrössen für das Zerschlagen und das Zerschleudern einander gleich sind. Dies ist durch das Experiment erwiesen. Hiedurch ist festgestellt, dass es erlaubt ist, $Hn = n\,A_1$ zu setzen, welche Beziehung allerdings die einfachste und natürlichste ist, so dass es den Anschein hat, als ob diese Gleichsetzung keines experimentellen Beweises bedürfte.

So wie der Widerstand gegen das Zerdrücken sehr wesentlich von der Form des Werkstückes abhängt, daher auch der Bruchfactor für jedes bestimmte Material und jede bestimmte Form zu ermitteln ist, so ist auch die Bruchhöhe mit Rücksicht auf Material und Form zu bestimmen. Man darf sich nicht der Meinung hingeben, als ob der z. B. für Gusseisen ermittelte Bruchfactor von 200 mkg auch für Würfel desselben Materiales annäherungsweise Geltung hätte. Man würde sich gewaltig täuschen, denn der Bruchfactor dieses Materiales beträgt für Würfel, deren untere Fläche unterstützt, deren Gegenfläche gepresst wird, das Zehnfache.

Man ersieht hieraus auch, dass die alte Methode, die Druck- oder rückwirkende Festigkeit lediglich mit Rücksicht auf die Querschnittsfläche des gedrückten Körpers zu bestimmen, eine irrige ist. (Vergl. die später behandelten Druckproben, s. d. Register.)

Die Bruchhöhe für verschiedene Formen experimentell zu ermitteln, geht deshalb nicht an, weil es schwer, bei freiem Falle gar nicht möglich ist, das Auffallen der Probestücke gerade so zu erzielen, wie man dies wünscht. In dem Gesagten ist die Thatsache enthalten, dass Kugeln desselben Materiales, gleichviel welche ihre Grösse ist, bei derselben bestimmten Fallhöhe oder, was dasselbe ist, bei derselben Geschwindigkeit, mit welcher das Anprallen an eine feste Wand erfolgt, zum Bruche gelangen. Die Bruchhöhe ist mithin eine bestimmte. Heisse dieselbe $h$, so ist — vom Luftwiderstande abgesehen — die End-

geschwindigkeit $v = \sqrt{2gh}$ und ist hierdurch die zur Erzielung des Bruches erforderliche Minimalgeschwindigkeit gegeben.

Die Bruchhöhe für Gusseisenkugeln $H = A_1 = 200$ gibt

$$v = \sqrt{2 \,.\, 9{,}848 \,.\, 200} \doteq 63 \text{ m}.$$

Dieser Werth wird sich aber sofort wesentlich vergrössern, wenn sich durch das Anprallen in jenem Materiale, gegen welches dasselbe erfolgt, eine Vertiefung bildet, weil, wie oben erwähnt, sich dann grössere Kegel bilden. Bei Materialien von geringerer Festigkeit kann dies zur Bestimmung der bei Desintegratoren anzuwendenden Tourenzahl dienen.

Wir gehen nun zu Anwendungen des Gesetzes der proportionalen Widerstände über, schliessen hieran die Darstellungen des Vorganges bei Auffindung desselben, dessen theoretische und experimentelle Begründung und reihen hieran eine weitere Besprechung der durchgeführten Experimente.

---

## II. Abschnitt.

# Anwendungen des Gesetzes der proportionalen Widerstände.

### Das Sprengen.

Jener Raum, in welchem bei vorzunehmenden Sprengungen das Sprengmittel, Explosiv, zu liegen kommt, wird bekanntlich Minenherd oder Pulversack genannt. Das Bohrloch, dessen Ende der Minenherd bildet, wird in geeigneter Weise versetzt, d. h. derart verstopft, dass die sich bei der Entzündung bildenden Explosionsgase nicht durch das Bohrloch entweichen können, sondern durch ihre Spannung bei normalem Vorgange eine kegelförmige Gesteinsmasse ausreissen, wie dies Fig. 7 andeutet. In dieser Figur bedeutet $AB$ die freie Wand des Gesteins, $M$ den Minenherd, $MC$ die Bohrlochtiefe oder die Vorgabe, auch kürzeste Widerstandslinie. Der Einfachheit der Betrachtung wegen denken wir uns den Minenherd als Hohlkugel. Die Masse des durch die Explosion herausgeworfenen Gesteins füllt den sogenannten Wurfkegel, d. i. den Raum $AMBCA$. Geometrisch ähnliche Formen vorausgesetzt, muss die Gleichung (2)

$$P : P_1 = 1 : a^2$$

unmittelbar anwendbar sein. Hierbei ist unter dem Grundverhältnisse $1 : a$ das Verhältniss der hier wesentlichsten Dimensionen, der Vorgaben zu verstehen.

Man erhält hiedurch zunächst den Satz:

Die gesammten Pressungen, welche die Explosive auf die Massen der Wurfkegel bei deren Abtrennung ausüben müssen, verhalten sich wie die Quadrate der Vorgaben.

Die gesammte, auf die Masse eines Wurfkegels ausgeübte Pressung ist gleich der specifischen Pressung mal der gedrückten Fläche, also $P = \sigma \,.\, f$, $P_1 = \sigma_1 \,.\, f_1$. Setzt man diese Werthe in obige Proportion, so findet man

$$\sigma f : \sigma_1 f_1 = 1 : a^2,$$

nachdem sich $f : f_1 = 1 : a^2$ verhält, so kann obige Relation nur bestehen, wenn

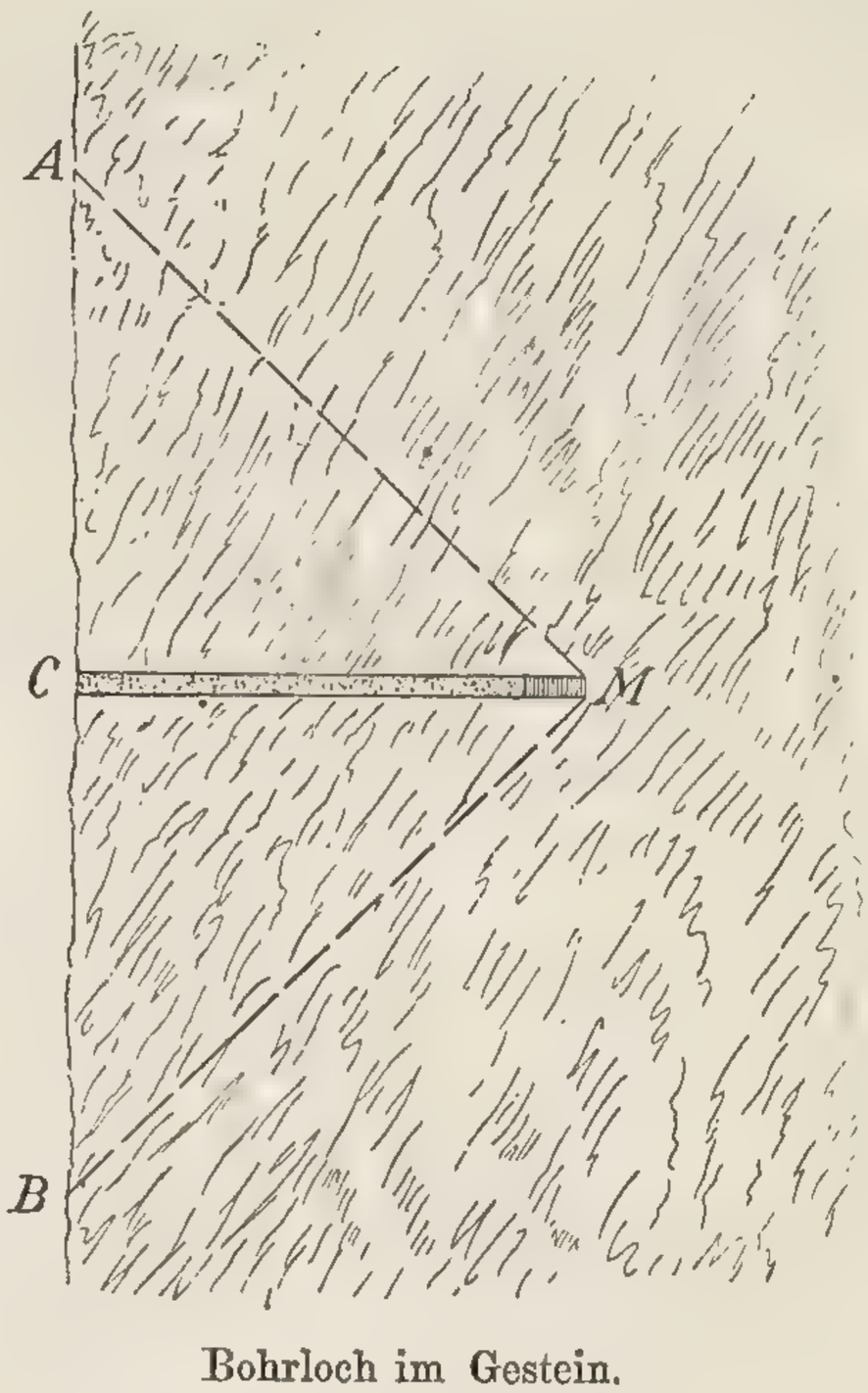
$$\sigma = \sigma_1 \text{ ist.}$$

Es lehrt dies, dass der vorbenannte Satz unter geometrisch ähnlichen Verhältnissen bei gleichem Materiale die weitere Consequenz in sich schliesst, dass in beiden Minenherden die gleiche Spannung der Explosionsgase herrscht.

Wann wird dieser Bedingung entsprochen?

Nachdem geometrisch ähnliche Verhältnisse vorausgesetzt sind, so müssen sich die Volumen der Minenherde wie die dritten Potenzen der Vorgaben verhalten,

Fig. 7.




Bohrloch im Gestein.

$V : V_1 = 1 : a^3 = \overline{MC}^3 : \overline{M_1 C_1}^3$. Es liefert die Gewichtseinheit des Explosivs bei vollkommener Vergasung eine bestimmte Gasmenge, mithin muss die specifische Spannung der Explosivgase unter sonst gleichen Verhältnissen dann die gleiche sein, wenn die Volumen der Minenherde proportional sind den Gewichten des Explosivs. Bezeichnen wir letztere — die Ladungen — mit $L$ und $L_1$, so wird für die gleiche specifische Spannung $V : V_1 = L : L_1$ sein müssen. Bei gleicher specifischer Spannung verhalten sich aber die Pressungen $P$, $P_1$ wie die gepressten Flächen der Minenherde, daher folgt

$$P : P_1 = F : F_1 = 1 : a^2,$$

d. h. wenn die Ladungen $L$ und $L_1$ proportional den Volumen der Minenherde sind, so ist dem obigen Satze entsprochen.

Durch Verbindung der Proportionen $V : V_1 = \overline{MC}^3 : \overline{M_1 C_1}^3$ und $V : V_1 = L : L_1$, welche bestehen müssen, soll die durch das Gesetz der proportionalen Widerstände geforderte Gleichung $P : P_1 = 1 : a^2$ erfüllt sein, findet man:

$$L : L_1 = \overline{MC}^3 : \overline{M_1 C_1}^3.$$

Nachdem aber die dritten Potenzen der Vorgaben auch proportional den Volumen der Wurfkegel sind, so erhält man den Satz:

Zwei normale Ladungen verhalten sich wie die Volumen der Wurfkegel.

Dieser Satz ist das alte Axiom der Sprengtechnik, vor 100 Jahren aus der Erfahrung von Lebrun abgeleitet und nun zurückgeführt auf das Gesetz der proportionalen Widerstände, aus welchem es durch eine Kette gewiss einfacher und sicherer Schlüsse folgt.

Wenn Callon*) sagt, dass es zwar der Theorie nach gleichgültig sei, in welchem Massstabe man die Sprengung ausführe, falls der Durchmesser des Bohrloches, seine Tiefe und die Länge der Pulversäule proportional gemacht sind (wenn also geometrische Aehnlichkeit besteht), dass es jedoch in der Praxis scheine, dass das Sprengen in grossem Massstabe vortheilhafter ist, so kann dies nicht befremden, wenn man erwägt, dass ja noch andere Einflüsse eine Rolle spielen müssen.

Sind die Minenherde geometrisch ähnlich, so verhalten sich deren Volumen stets wie $d^3 : d_1{}^3$, deren Oberflächen wie $d^2 : d_1{}^2$. Die Oberflächen wachsen mithin bei zunehmenden $d$ im quadratischen, die Kubikinhalte der Minenherde jedoch im kubischen Verhältnisse. Mit den Oberflächen im directen Zusammenhange muss die auf die Spannung der Explosionsgase Einfluss nehmende Abkühlung, bedingt durch die Wärmeaufnahme der Wände, stehen. Je grösser die Oberfläche in Beziehung zum Rauminhalte ist, um so mehr Wärme wird abgeleitet, um so mehr sinkt die Spannung und daher die Wirkung der Explosionsgase. Dieser Einfluss wird besonders bei solchen Explosivstoffen, welche in grösseren Mengen nicht „momentan“ zur Entzündung gelangen, nicht „pressant“ genug sind, fühlbar werden, weil die Zeit, während welcher die Abkühlung der Gase wirken kann, etwas grösser wird; im Allgemeinen ist gewiss die verhältnissmässig günstigere Wirkung grösserer Ladungen hiedurch erklärt.

Ein zweiter, in vielen Fällen sehr belangreicher Grund, welcher für grössere Abmessungen des Bohrloches und dementsprechend stärkere Ladungen spricht, liegt in den Schichtungen der meisten Gesteine und dem stellenweise geringeren Zusammenhange. Das tiefere Bohrloch und die stärkere Ladung muss im Allgemeinen häufiger solche Stellen beeinflussen und das Volumen der abgelösten Massen vergrössern.

Jedes Gesetz wird in der Praxis durch Nebeneinflüsse beeinträchtigt, deren richtige Einbeziehung entweder dem praktischen Gefühle oder der auf die Nebeneinflüsse sich gleichfalls erstreckenden Theorie vorbehalten ist. Die Feder und das Blei fallen im luftleeren Raume gleich schnell, das Gesetz der Gravitation ist unzweifelhaft richtig; wie sehr aber der Luftwiderstand die Bewegungserscheinungen beeinflusst, ist täglich wahrzunehmen und doch sehr schwierig derart in Rechnung zu stellen, dass

*) Cours professés à l'Ecole des Mines de Paris, par M. J. Callon, Inspecteur général des mines. Paris 1874. T. I, p. 174. Citat aus Höfer's „Beiträgen zur Spreng- u. Minentheorie“, Wien 1880, S. 41. Sep.-Abdr. a. d. Oesterr. Zeitschr. für Berg- u. Hüttenwesen Jahrg. 1880.

die Ergebnisse im guten Einklange mit der Erfahrung, beziehungsweise mit correcter Beobachtung stehen.

Da sorglich geführte Versuche vor allem Anderen massgebend erscheinen, die Vornahme eigentlicher Sprengversuche in sehr gleichförmigem Materiale dem Referenten noch nicht möglich war, so hat er Cementklötze, in welchen je ein kugelförmiger Hohlraum — durch Einformen und späteres Ausschmelzen einer Wachskugel — als Minenherd gebildet war, durch hydraulischen Druck zu sprengen versucht. Das Ergebniss war, dass geometrisch ähnliche Probestücke gleicher Masse bei gleicher specifischer Pressung zum Bruch gebracht wurden, wie es zufolge des Seite 9 aufgestellten Satzes sein musste. (Vergl. Abschnitt V.)

## Berstungsfestigkeit. Röhren unter innerem oder äusserem Drucke.

Die soeben besprochenen Versuche waren eigentlich keine anderen als Versuche auf Berstungsfestigkeit. Zwei geometrisch ähnliche Körper gleicher Masse halten gleiche innere specifische Pressungen aus. Ist also für den einen Körper die innere specifische Pressung, welcher er Stand hält, experimentell gefunden, so muss der geometrisch ähnliche Körper gleicher Masse dieselbe innere Pressung vertragen.

Gerade so wie im vorstehenden Abschnitte Nebenumstände vorhanden waren, welche für Sprengungen den Gebrauch grösserer Abmessungen vortheilhaft erscheinen liessen, so sind auch hier Nebenumstände nicht zu übersehen, welche den Gebrauch obiger Regel nur gestatten, wenn denselben Rechnung getragen wird.

Im Allgemeinen wird der kleinere, geometrisch ähnliche Körper bei ganz gleichartiger Herstellungsweise vollkommener im Materiale sein, sowie Feindraht fester ist als grober Draht. Man wird daher die Qualität des Materiales sehr scharf im Auge haben müssen, damit die Bedingung der Gleichheit der Masse wirklich erfüllt ist.

Wo es sich um die Berstungsfestigkeit von Röhren handelt, kommt deren Länge gewöhnlich nicht in Betracht, die geometrische Aehnlichkeit braucht sich daher nur auf das Verhältniss des äusseren zum inneren Durchmesser zu beziehen. Es muss $D_1 : d_1 = D_2 : d_2$ sein.

Stehen Röhren geometrisch ähnlicher Form unter äusserem Drucke, so kann die Gleichung (2) in der Schreibweise

$$P : P_1 = O : O_1,$$

Anwendung finden. Setzen wir den gleichen äusseren specifischen Druck voraus, so ist $P = \sigma O$ und $P_1 = \sigma O_1$, und dies eingesetzt, wird die Gleichung zu einer identischen

$$\sigma O : \sigma O_1 = O : O_1,$$

d. h. Röhren geometrisch ähnlicher Form gleichen Materiales halten den gleichen äusseren specifischen Pressungen Stand.

Da es auch hier in der Regel auf die Länge nicht ankommt, wird die Proportion

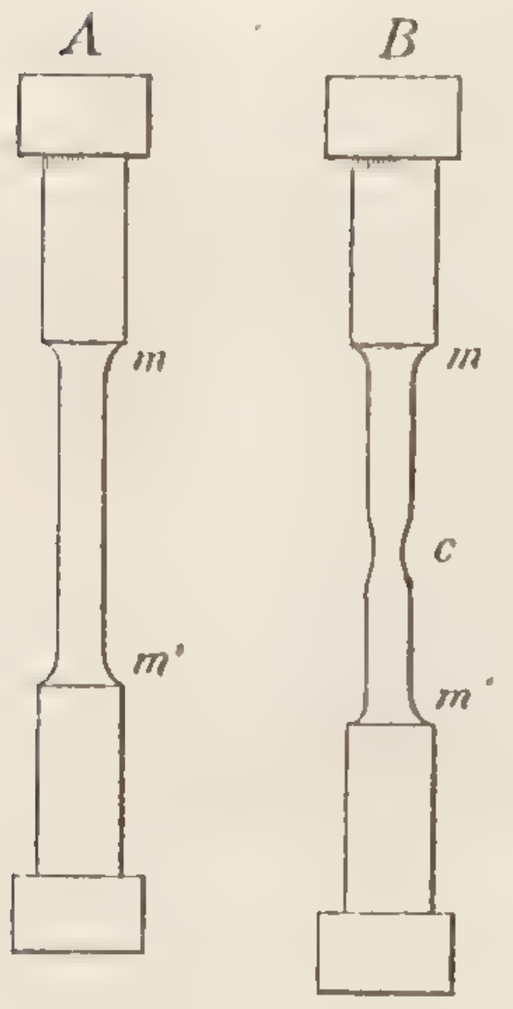
$$D_1 : d_1 = D_2 : d_2$$

zur Bestimmung der Wandstärke des grösseren Rohres dienen können, wenn durch Versuche die Widerstandsfähigkeit eines kleineren ermittelt ist.*)

## Zugfestigkeit.

Wird ein Stab, wie ihn Fig. 8a darstellt, einer Zugspannung unterworfen und die Elasticitätsgrenze überschritten, so findet zwischen $mm'$ eine Dehnung und an der Bruchstelle $c$ eine Contraction statt. Sind geometrisch ähnliche Probestäbe aus demselben Materiale gegeben, so muss $P : P_1 = 1 : a^2$ sein, soll die Deformation übereinstimmend erfolgen. Umgekehrt lässt sich auch behaupten, dass, wenn $P : P_1 = 1 : a^2$ ist, die Deformation übereinstimmend erfolgen müsse, d. h. dass auch die Dehnung und die Contraction bei beiden Probestäben dem Grundverhältnisse $1 : a$ entsprechen müsse. (Siehe Register bei Barba's Aehnlichkeitsgesetz.)

Fig. 8.




## Druckfestigkeit.

Werden geometrisch ähnliche Steinprismen oder Cylinder oder andere geometrisch ähnliche Probestücke desselben spröden Materiales Pressungen unterworfen, bis der Bruch auftritt, so müssen die Bruchbelastungen nach (2) sich wie die Querschnitte,

*) Zu diesen Betrachtungen führte eine Frage aus der Praxis, welche s. Z. mit Hinweis auf das Gesetz der proportionalen Widerstände ihre rasche Erledigung fand. Diese Frage lautete dem Sinne nach so: In einem Concentrator befinden sich Bleirohre unter einem inneren Drucke von $3^1/_2$ Atmosphären; demselben Druck halten Bleiröhren Stand, deren innerer Durchmesser 30 mm, deren äusserer 50 mm beträgt. Wie dick in der Wandstärke sind die Rohre zu machen, wenn ihr innerer Durchmesser 50 mm betragen soll? Diese Frage löst sich einfach durch die obige Beziehung $d : D = d_1 : D_1$, wir haben $30 : 50 = 50 : x$, $x = 83{,}3$ mm, daher die doppelte Wandstärke $D_1 - d_1 = 83{,}3 - 50 = 33{,}3$ mm beträgt, die einfache 16,6 mm.

Hätte die Angabe für inneren Druck nicht bereits für einen concreten Fall vorgelegen, so wäre im Kleinen ein Versuch durchzuführen gewesen. In ganz gleichartiger Weise würde sich die Aufgabe für äusseren Druck lösen; auch hier muss entweder schon ein Fall vorliegen, welcher bei gleichem äusseren specifischen Druck eine dauerhafte Anlage aufwies, oder es muss erst ein solcher Versuch gemacht werden,

$P : P_1 = f : f_1$, verhalten, oder mit anderen Worten: geometrisch ähnliche Probestücke desselben Materiales halten den gleichen specifischen Pressungen Stand. (Vergl. Vicat's Aehnlichkeitsgesetz, s. Register.)

## Biegung von Stäben.

Es folgt aus dem ersten und zweiten Satze (Seite 1 u. 2) unmittelbar:

Stäbe geometrisch ähnlicher Form desselben Materiales bedürfen zu proportionaler Durchbiegung, wenn sie in gleicher Art unterstützt oder befestigt und in gleicher Weise beansprucht sind, Arbeitsgrössen, welche sich wie ihre Volumen, oder Pressungen, welche sich proportional ihren Querschnitten verhalten.

Dieser Satz lässt sich übrigens auch aus den bisher gebräuchlichen Formeln für die Biegungsfestigkeit, insofern die Beanspruchung innerhalb der Elasticitätsgrenze liegt, leicht ableiten und bietet nur insofern Neues, als die Beschränkung auf elastische Deformation entfällt. Der Satz gilt auch für bleibende Formänderung, einschliesslich dem Bruche.

## Torsion.

Stäbe geometrisch ähnlicher Form desselben Materiales bedürfen zu proportionaler Verdrehung (Torsion) Arbeitsgrössen, welche sich wie die Volumen oder Torsionsmomente, welche sich wie die Querschnitte verhalten.

Auch dieser Satz lässt sich, insofern die Inanspruchnahme innerhalb der Elasticitätsgrenze bleibt, aus den für die Torsion gebräuchlichen Formeln ableiten und enthält sachlich somit nur das Neue, dass er bis zum Bruche, diesen eingeschlossen, Geltung hat.

---

Ganz Aehnliches gilt für die Knickungsfestigkeit; auch in Bezug auf diese führt das Gesetz der proportionalen Widerstände direct nur insofern zu neuen Resultaten, als seine Anwendung über die Elasticitätsgrenze hinaus zulässig ist. Es würde sich empfehlen, zur weiteren Controle der, den Formeln der Festigkeitslehre zu Grunde liegenden Annahmen Versuche mit möglichst gleichartigen Materialien in der Weise vorzunehmen,

---

von welchem aus man dann für denselben äusseren Druck, aber andere Abmessungen, die erforderlichen Wandstärken rechnen kann. Wenn auch sowohl auf äusseren als inneren Druck das Gesetz der proportionalen Widerstände anwendbar ist, so kann doch nicht — es braucht dies eigentlich kaum gesagt zu werden — von einem Falle, wo äusserer Druck herrschte, auf einen Fall, bei welchem innerer Druck vorhanden ist, geschlossen werden; denn ein Rohr kann einen bestimmten inneren specifischen Druck anstandslos vertragen, ohne der gleichen äusseren specifischen Pressung Stand zu halten. Bei Blei muss der Versuch ein langandauernder sein, denn dieses Metall hat die Eigenschaft, unter derselben Pressung tagelang „zu fliessen", d. h. sich äusserst langsam zu deformiren (s. Register bei Druckproben mit Blei).

dass stets nur eine der Hauptdimensionen verändert und der Einfluss dieser Veränderung auf den Widerstand ermittelt würde. Hiebei müssten die Versuchsstücke aus denselben Rohformen durch Wegnahme von Spänen (Drehen, Hobeln, Feilen etc.) hergestellt werden.

## Zerschlagen, Zerstampfen, Zerdrücken, Pulverisiren.

Es wurde bereits im ersten Abschnitte Seite 5 hervorgehoben, dass die Arbeitsgrösse, welche erforderlich ist, eine bestimmte Menge geometrisch ähnlicher Stücke desselben Materiales in übereinstimmender Weise zu zerkleinern, sich als das Product aus dem Gewichte dieser Stücke und der für die übereinstimmende Verkleinerung der Gewichtseinheit erforderlichen Arbeitsgrösse darstellt. Diese Beziehung ist durch viele und sehr gut stimmende Versuche festgestellt und unterliegt keinem Zweifel, sie stellt sich überdies als specieller Fall des Gesetzes der proportionalen Widerstände dar; andererseits ist dieselbe aber befremdend, denn man ist nur zu sehr geneigt, die Brucharbeit in directe Beziehung zur Grösse der Bruchfläche zu bringen. Es ist die Annahme sehr verführerisch, dass die Zerreissung des Zusammenhanges eine Arbeitsgrösse erfordere, welche proportional der Bruchfläche ist. Diese Annahme schien so selbstverständlich, dass sie stets ohne jeden Hinweis als richtig betrachtet wurde. So sagt Rittinger (1867) in seinem s. Z. vorzüglichen Lehrbuche über Aufbereitung S. 22:

„Die zur Zerkleinerung erforderliche Arbeit wächst im Verhältnisse zum Verkleinerungsgrade. Zur näheren Erläuterung dieses Satzes sei ein Steinwürfel von durchaus gleichmässiger Beschaffenheit und von einer beliebigen Seitenlänge $s$ gegeben; ferner betrage die Arbeitsgrösse, welche erforderlich ist, um diesen Würfel parallel zu einer Seitenfläche zu zertheilen, $a$ Fusspfunde. Denkt man sich die drei auf einander senkrechten Seitenkanten des Würfels der Reihe nach in 2, 3, 4 . . . $n$ gleiche Theile getheilt und die Theilung des Würfels in Ebenen ausgeführt, die mit den 3 Seitenflächen desselben parallel laufen, so erhält man nacheinander:

8 Würfel von $^1/_2\ s$ Seitenlänge mittels $3 \times 1 \times a$ Fusspfund Arbeit,
27 „ „ $^1/_3\ s$ „ „ $3 \times 2 \times a$ „ „
64 „ „ $^1/_4\ s$ „ „ $3 \times 3 \times a$ „ „
⋮
$n^3$ „ „ $\frac{1}{n}\ s$ „ „ $3\,(n-1)\,a$ „ „

Je kleinere Seitenkanten also die durch die Zerkleinerung gewonnenen Würfel gegenüber dem ursprünglichen Würfel erhalten, d. h. je kleiner der Zerkleinerungsquotient $\frac{1}{n}$ ist, desto grösser ist der zur Zerkleinerung erforderliche Arbeitsaufwand $A_n = 3\,(n-1)\,a$. Es verhalten sich daher die in zwei Zerkleinerungsfällen erforder-

lichen Arbeitsgrössen $\frac{An}{Am} = \frac{n-1}{m-1}$, näherungweise, bei weit getriebener Zerkleinerung wie $n : m$.“

Daraus folgerte nun Rittinger den Satz:

„Die Arbeitsgrössen stehen daher nahezu im geraden Verhältnisse zum Zerkleinerungsgrade oder im umgekehrten Verhältnisse zum Zerkleinerungsquotienten; und weiter: Die zum Zerkleinern erforderliche Kraft steht mit dem Oberflächenzuwachse in geradem Verhältnisse.“

Diesen Satz setzte auch Prof. C. Fink in einer Abhandlung „Theorie der Walzen-Arbeit“ (Zeitschrift für das Berg-, Hütten- und Salinenwesen in dem preussischen Staate 1874, Bd. 22, S. 201) in jenem Abschnitte, welcher vom Kraftbedarfe für das Zerdrücken handelt, als ganz selbstverständlich voraus; und Prof. Hans Höfer nahm in seinen Beiträgen zur Spreng- und Minentheorie an, dass die Arbeitsgrössen für die Lostrennung der Wurfkegel proportional seien den Oberflächen derselben, also den Trennungsflächen, während sie thatsächlich den Volumen proportional sind.

Rittinger, Fink, Höfer und mit ihnen Andere hielten die genannte Voraussetzung für selbstverständlich. Diese Irrung, welche eigentlich nur in einer Verwechslung zwischen Kraft und Arbeit besteht, ist in mehrfacher Beziehung lehrreich. Wir möchten daraus folgern, dass Annahmen über das Verhalten des Materiales bei Formänderungen stets durch Versuche geprüft werden müssen; denn mit Rücksicht darauf, dass dem Menschen das Wesen der Materie sowie die Grundgesetze der Molecularmechanik unbekannt sind, fehlt ihm die Grundlage zu sicheren Annahmen. Auch die Annahmen der mechanischen Festigkeitslehre sollten einer möglichst unmittelbaren Revision durch das Experiment unterworfeu werden.

Der Grundsatz der mechanischen Aufbereitung war irrig und doch hat dies nicht geschadet! — Wie war dies möglich? Nur dadurch, dass derselbe weder in Rittinger's Werk, noch sonst in der Literatur zu weiteren Consequenzen benutzt wurde, welche auf die Praxis irgend welchen Einfluss nahmen. Rittinger selbst entlehnte seine Angaben über den Arbeitsverbrauch bei Stampfwerken nur der Praxis, konnte daher, weil er die Consequenzen aus dem von ihm aufgestellten Grundsatze nicht zog, auch mit der Praxis nicht in Widerspruch gerathen. Durch etwa 16 Jahre galt ein falscher Grundsatz, bis der Autor dieser Zeilen dagegen Einsprache erhob; diese Wahrnehmung ist wohl recht geeignet, das Mass der Freude über die gefundene richtige Beziehung mit Rücksicht auf deren Gebrauch in der Praxis zu mässigen, denn die Praxis braucht für die Lösung bekannter Aufgaben desselben nicht mehr. Zudem ist die unmittelbare Anwendung des Gesetzes der proportionalen Widerstände für Verkleinerungsarbeiten eine beschränkte, weil dasselbe nur für geometrisch ähnliche Körper gleichen Materiales gilt.

Hätte man z. B. Flusssand gleichen Materiales von annäherungsweise kugeliger Form, aber verschiedener Korngrösse zwischen Walzen zu verkleinern, dann könnte man sagen, dass zu übereinstimmender Verkleinerung Arbeitsgrössen erforderlich sind, proportional dem Sandgewichte. Dasselbe würde Geltung haben, wenn der Müller Gries verschiedener Nummer (Korngrösse) übereinstimmend zu theilen, aufzulösen hätte. Wie sich aber die Arbeitsgrösse für die Theilung eines kugelförmigen zu einem würfelförmigen etc. Stücke verhält, darüber gibt das Gesetz keinen Aufschluss. Diese Einschränkung begrenzt den Gebrauch.

Es bleibt zunächst nichts Anderes übrig, als für die einzelnen Formen und Materialien die Bruchfactoren zu ermitteln. Soviel kann allerdings schon aus den Versuchen jetzt gefolgert werden, dass ein Schlag von grösserer Intensität, als zur primären Theilung erforderlich, zahlreiche secundäre Theilungen zur Folge hat, weil eine viel geringere Arbeitsgrösse zur Theilung genügt, als jene wäre, welche der Flächensumme aller Bruchflächen entsprechen würde.

Von wesentlichem Werthe ist das Gesetz der proportionalen Widerstände für die Praxis insofern, als durch dasselbe eine treffliche Handhabe zur Verwerthung weniger Experimente geboten ist. Soll z. B. die Verkleinerung von Erz erfolgen und hat man die dazu nöthige Arbeitsgrösse für den Gebrauch von Stampfwerken zu ermitteln, so gelingt dies mittels eines einfachen Fallwerkes durch folgenden Vorgang sehr leicht. Man wählt einige kleine Stücke von annähernder Kugelform, wägt diese Stücke und unterwirft nun eines nach dem anderen in der Weise der Einwirkung des Schlagwerkes, dass man mit so kleinen Fallhöhen, welche noch keinen Bruch bewirken, beginnt und allmälig zu grösseren Höhen übergeht, bis endlich der Bruch erfolgt. Sei $G$ das Gewicht eines Stückes, $Q$ das Gewicht des Fallklotzes, $H$ die Höhe jenes Hubes, bei welchem der Bruch erfolgt, so ist $QH$ die Bucharbeit für das Stück vom Gewichte $G$ und $A_1 = \frac{QH}{G}$ die auf die Gewichtseinheit reducirte Brucharbeit oder der Bruchfactor für die gewählte Form und das bestimmte Material. Bei klumpigen oder annähernd kugeligen Stücken wird der Werth von $A_1$ wenig verschieden gefunden werden, man wird daher mit einigen Versuchen den gewünschten Mittelwerth feststellen können. Will man die Brucharbeit für ruhigen Druck feststellen, dann bedarf es allerdings besonderer Vorrichtungen; auch auf Festigkeitsmaschinen ist dies äusserst schwierig, weil die Formänderung vor erfolgendem Bruche oder der Weg der Kraft so klein ist, dass er nur sehr schwer genau genug gemessen werden kann.

Man wird jedoch für die Praxis meist Resultate erhalten, welche verwendbar sind, wenn man die halbe Schlagarbeit oder $\frac{A_1}{2}$ als Bruch-

arbeit für die Gewichtseinheit des Materiales und für ruhigen Druck annimmt. (Vergl. Abschnitt VI; Register, Beziehungen von Druck u. Stoss.)

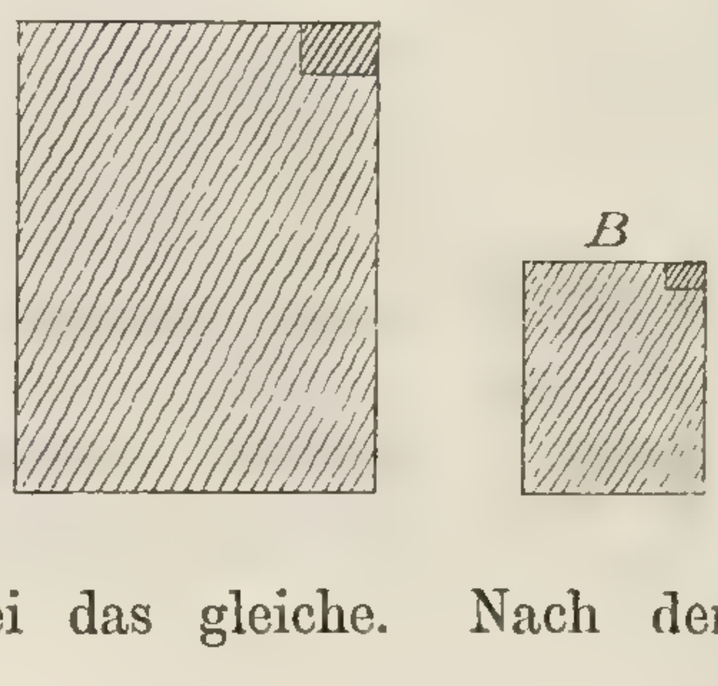
Es wurde S. 6 gezeigt, dass die Arbeit fürs Zerschleudern gleich der Arbeit fürs Zerschlagen ist: Bruchfactor = Bruchhöhe.

Man hat also durch die Bestimmung des Bruchfactors $A_1$ in Meterkilogrammen zugleich die Bruchhöhe $H$ in Metern gegeben. Der Höhe $H$ entspricht aber die Fallgeschwindigkeit $v = \sqrt{2gH}$, und es ist somit auch jene Geschwindigkeit gegeben, bei welcher beim Anpralle an eine feste Wand der Bruch erfolgt. — Indem es gleichgültig ist, ob der zu theilende Körper mit der Geschwindigkeit $v$ gegen eine feste Wand oder diese mit derselben Geschwindigkeit gegen den freibeweglichen Körper trifft, so hat man in der vorstehenden Methode der Bestimmung der Bruchgeschwindigkeit $v$ auch das Mittel, die erforderliche Geschwindigkeit von Desintegratoren oder Schleudermühlen zu bestimmen. Für trockenen Thon in kugeliger Form beträgt die Bruchhöhe ca. 3 bis 5 m, für Quarz ca. 40 m; würde man nun ein trockenes Gemenge von Thon oder Porzellanmasse mit Sandkörnern der Wirkung eines Desintegrators aussetzen, dessen Geschwindigkeit $v = \sqrt{2 \,.\, g \,.\, 32} \doteq 25^{\text{m}}$ wäre, so würde ohne Zweifel der Thon zerstäubt, während die Quarzkörner unverletzt blieben, und diese beiden Materialien liessen sich dann durch Siebe trennen. Die Einwendung, dass der Thon, wenn er auch getrocknet wäre, doch nicht Kugelform besitze, daher der für die Kugelform ermittelte Bruchfactor keine Geltung haben könne, fällt hier darum weniger in die Wagschale, weil klumpige Stücke nahe denselben Bruchfactor wie Kugeln besitzen, andererseits die Desintegrator-Schlagbolzen durch ihre Form zu leichterer Theilung führen als ebene Schlagflächen und endlich die Bruchhöhe von 32 m die erforderliche weit übersteigt. Es ist das Vorstehende ein Beispiel der Verwerthung der Bruchhöhen, deren Gleichheit für gleiches Material und gleiche Form eine Folgerung des Gesetzes ist.

## Ueber das Abtrennen von Spänen.

Hobeln, Drehen, Bohren und Fräsen sind die so oft gebrauchten Operationen, bei welchen durch Abtrennen von Spänen die Formänderung von Materialien erfolgt. Es führt auch hier das Gesetz der proportionalen Widerstände zu einer recht einfachen und wichtigen Regel. Es seien in Fig. 9 zwei geometrisch ähnliche Werkstücke im Schnitte dargestellt. Von denselben werden geometrisch ähnliche Späne durch geometrisch ähnliche Werkzeuge bei gleicher Gebrauchsweise abgetrennt. Das Material der Werkstücke sei das gleiche. Nach dem ersten Satze ist:

Fig. 9.




$$A : A_1 = V : V_1.$$

Nachdem, der vorausgesetzten geometrischen Aehnlichkeit wegen, die Volumen der Werkstücke und der Späne in demselben Verhältnisse stehen, so kann unter $V$ und $V_1$ ebensowohl das Verhältniss der Volumen der Werkstücke als der Späne verstanden werden, und wir erhalten hier unmittelbar den Satz:

Werden zwei geometrisch ähnliche Werkstücke derart übereinstimmend behobelt, dass auch die Späne geometrisch ähnlich sind, so verhalten sich die erforderlichen Arbeitsgrössen wie die Volumen oder Gewichte der Späne.

Unter der gemachten Voraussetzung sind die erforderlichen Arbeitsgrössen proportional den Spanvolumen. Diese Voraussetzung kann aber erfüllt werden, und daraus ist ersichtlich, dass man mit proportionalem Arbeitsaufwande $A$ ein Volumen $V$ in grobe Späne umwandeln kann, während mit $A_1$ das Volumen $V_1$ in feinere Späne verwandelt wird.

Nun ist $A : A_1 = V : V_1$ oder $A = \frac{A_1}{V_1} V = \frac{A_1}{G_1} . G = cG$, wobei $V$ das Spanvolumen und $G$ das Spangewicht darstellt.

Für geometrisch ähnliche Spanform und gleiches Material wird $\frac{A_1}{G_1} = c$ ein constanter Factor sein. Aus $A = cG$ folgt aber, dass unter Voraussetzung geometrischer Aehnlichkeit und gleichen Materiales zur Bildung eines bestimmten Spangewichtes $G$ eine bestimmte Arbeitsgrösse $A$ erforderlich ist, gleichviel ob feine oder grobe Späne genommen werden. Man kann hieraus den Satz folgern:

Zur Bildung eines bestimmten Gewichtes geometrisch ähnlicher Späne gleichen Materiales ist eine bestimmte Arbeitsgrösse erforderlich, welche unabhängig ist von der Grösse der Späne.

Dieser Satz gilt für geometrisch ähnliche Späne gleichen Materiales auch dann, wenn die Arbeitsstücke selbst, von welchen die Späne genommen wurden, nicht geometrisch ähnlich sind, denn die körperliche Form des Arbeitsstückes ist ja von keinem Einflusse auf die pro Gewichtseinheit der Späne zu leistende Arbeit. Hätte man von dem Arbeitsstücke $B$ (Fig. 9) einen Span vom Querschnitte desjenigen, welcher von $A$ abgetrennt wurde, und von gleicher Länge genommen, so wäre die Arbeit die gleiche gewesen. — Ausserordentlich verschieden kann hingegen die aufzuwendende Arbeit bei demselben Materiale und demselben Spangewichte dann sein, wenn die Späne nicht geometrisch ähnlich sind, wenn sie beim Abtrennen durch die verschiedene Form oder Anstellung des Werkzeuges in verschiedener Weise deformirt, gestaucht werden. Ein Vergleich der Fig. 2 bis 6, Taf. II, erhärtet das Gesagte ohne Weiteres.

Der vorstehende Lehrsatz ist nicht mehr befremdend als der frühere über das Zerkleinern geometrisch ähnlicher Körper. Bei diesem hatte der Bruchfactor $\frac{A}{G}$ die analoge Bedeutung wie hier der constante

Coëfficient $c = \frac{A_1}{G_1}$. Uebrigens muss ausgesprochen werden, dass es seine Schwierigkeit hat, auch bei ganz übereinstimmender Anstellung des Werkzeuges und durchaus geometrisch ähnlichen Verhältnissen wirklich geometrisch ähnliche Späne zu erhalten; der Grund hiervon liegt darin, dass keine Schneide eine mathematische Linie bildet. Stets ist sie etwas abgerundet und beeinflusst hiedurch die Art der Spanbildung. Es wird sich daher in jenen Fällen, wo sehr grobe mit sehr feinen Spänen verglichen werden, zeigen, dass auch bei übereinstimmender Spanbildung (ähnlicher Werkzeugform, gleicher Anstellung des Werkzeuges und gleichem Materiale) doch nicht genau geometrisch ähnliche Späne gebildet werden; hierdurch wird die Uebereinstimmung des Versuches mit der Theorie natürlich beeinträchtigt. Ein anderer Umstand ist der, dass nur die Breite des Spanes durch entsprechende Einstellung des Werkzeuges genau oder doch ziemlich genau bestimmt werden kann. Die Dicke des genommenen Spanes lässt sich aus der Einstellung des Werkzeuges nie ganz genau ermitteln, sondern diese muss aus der Breite, der behobelten Länge, dem Spangewichte und der Dichte des Materiales durch Rechnung bestimmt werden. Es ist dies nöthig, weil elastische, auf die Höhenlage der Schneide einwirkende Durchbiegungen des Werkzeuges und des Messerhauses auftreten, welche sich der directen Bestimmung entziehen.

Aus der früher gegebenen Proportion: $A : A_1 = V : V_1$ lässt sich auch noch Weiteres folgern.

Der Druck, welcher vom Werkzeuge während der Bildung des Spanes ausgeübt wird, wächst zwar im ersten Wegstücke, beim Beginne der Spanbildung von Null bis zu einer Grösse $P$ und nimmt am Ende von $P$ zu Null ab, bleibt aber während des grössten Theiles des Weges constant. Betrachtet man nun bei Bildung zweier geometrisch ähnlicher Späne nur jene proportionalen Wege, während welcher $P$ constant ist, so hat man für diese

$$A' : A_1' = Pl : P_1 l_1 = V' : V_1';$$

nun ist das Spanvolumen $V' = bhl$, wobei unter $b$ die Breite, längs welcher am Werkstücke der Span abgetrennt wurde, unter $h$ die Höhe und unter $l$ die Länge verstanden ist, so dass $bhl$ das Volumen des Materiales vorstellt, welches in einen Span verwandelt wurde. Ebenso ist $V_1' = b_1 h_1 l_1$, dies eingesetzt gibt

$$Pl : P_1 l_1 = bhl : b_1 h_1 l_1 \text{ oder } P : P_1 = bh : b_1 h_1 = f : f_1.$$

Mithin verhalten sich die Pressungen, welche das Werkzeug bei Bildung geometrisch ähnlicher Späne gleichen Materiales auszuüben hat, wie die Querschnitte ($f$, $f_1$) der abgetrennten Materialstreifen.

Die gründlichste Arbeit über das Hobeln der Metalle ist J. Thime's Mémoire sur le rabotage des métaux, St. Petersburg 1877; in derselben gelangt Thime zur Gleichung

$$F = \frac{\sin \alpha}{\sin \beta_1 \sin \beta} Rbc.$$

In derselben haben $\alpha$, $\beta$, $\beta_1$ die aus der nachstehenden Figur 10 ersichtliche Bedeutung, ferner ist $\beta_1 = 180^0 - (\alpha + \beta)$, $F$ ist unser $P$, $R$ ein Widerstandscoëfficient, mithin für ein bestimmtes Metall eine constante Grösse; endlich wird für geometrisch ähnliche Formen der Werth $\frac{\sin \alpha}{\sin \beta_1 \sin \beta}$ zur Constanten; $b$ ist die Breite, $c$ die Dicke gleich unserem $h$, mithin geht Thime's Formel in unserer Schreibweise für geometrisch ähnliche Verhältnisse über in

$$P = c \,.\, bh,$$

wodurch man gleichfalls zur Proportion

$$P : P_1 = bh : b_1 h_1$$

gelangt.

Fig. 10.

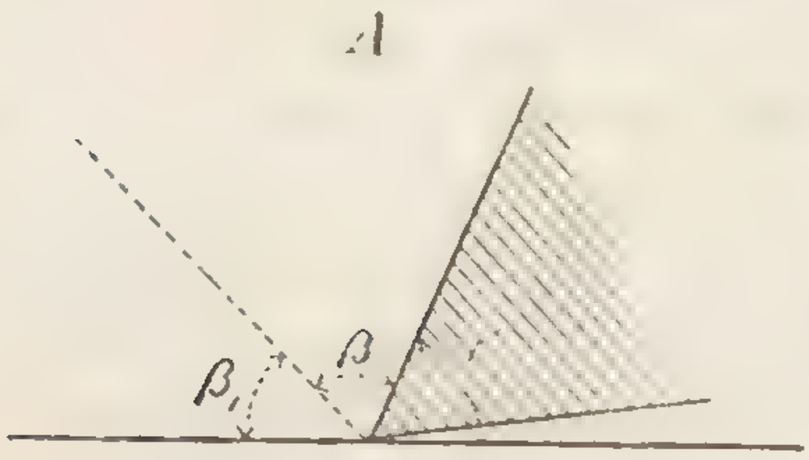
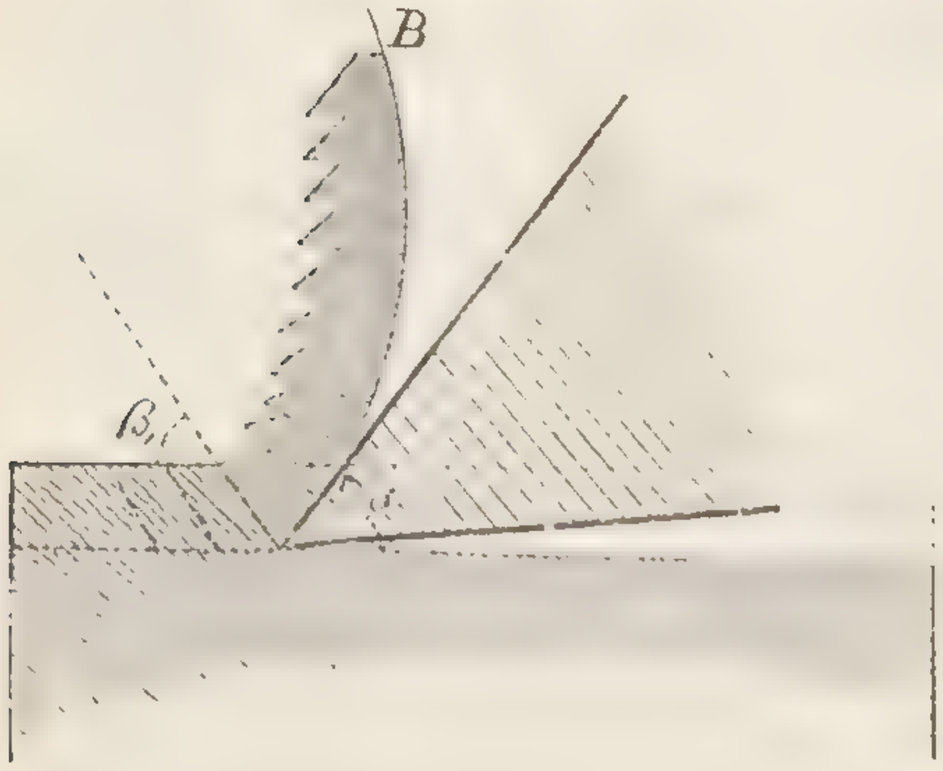



Fig. 11.




Die Art der Spanbildung, wie sie bei feinkörnigen und wenig bildsamen Metallen deutlich wahrgenommen werden kann, mag Fig. 11 versinnlichen, welche eine Wiedergabe der Fig. 7 der Thime'schen Monographie ist. Thime's Arbeit ist insofern noch unvollständig, als bei ihm die Horizontaltracen der wirksamen Ebene des Werkzeuges stets senkrecht auf die Bewegungsrichtung stehen, daher kein seitliches Abfliessen der Späne erfolgt, sondern die Krümmungslinien der Späne in Verticalebenen liegen. Unter dieser Beschränkung konnte er sich auf die Angabe der Winkel $\alpha$ und $\beta$ und des Supplementwinkels dieser beiden ($\beta_1$) beschränken, während bei allgemeinerer Stellung des Werkzeuges diese Winkel nicht genügen würden. Immerhin bildet Thime's ausgezeichnete Arbeit, wenn sie auch nicht völlig allgemein gehalten ist, eine werthvolle Bestätigung des Gesetzes der proportionalen Widerstände; denn diese Arbeit ruht durchaus auf experimenteller Grundlage, und zwar auf vielseitigen, gewissenhaften Versuchen, deren dynamometrischer Theil allerdings an dem Uebelstande leidet, dass in den Angaben die passiven Widerstände der Arbeitsmaschine enthalten sind.

Die Arbeiten des Fräsens, Drehens und Bohrens, letzteres insoweit der Bohrer rotirend und unter Druck wirkt, sind grundsätzlich mit dem Hobeln übereinstimmend, daher müssen auch hier die obigen Sätze Geltung haben. Die zum Fräsen, Drehen oder Bohren in demselben Materiale bei Anwendung geometrisch ähnlicher Werkzeuge und der Erlangung geometrisch ähnlicher Späne aufgewendeten Arbeitsgrössen müssen proportional den Spangewichten und die erforderlichen Pressungen proportional den Querschnittsflächen der Späne sein.

Mit dem Hobeln nicht verwandt ist dasjenige Bohren, welches mit dem Meisselbohrer, dem Stossbohrer und den Percussionsbohrmaschinen in Gesteinen zur Anwendung kommt und welches der Kürze wegen Meisselbohren oder Lochmeisseln genannt werden könnte. Es lassen sich aber auch auf diese Operation alle die Schlüsse, welche auf das Hobeln angewendet wurden, darum übertragen, weil das Gesetz der proportionalen Widerstände sowohl für bildsame als für spröde Körper, sowohl für Druck als Stoss Geltung besitzt, nur muss immer die gleiche Einwirkungsart in Vergleich gezogen werden. Daher muss bei geometrisch ähnlichen Werkzeugen und übereinstimmender Anwendung auch hier die aufzuwendende Bohrarbeit proportional dem Spangewichte oder dem Volumen des Bohrloches sein.

In dem Augenblicke jedoch, als man die Bedingung der geometrischen Aehnlichkeit bei Seite setzt, hört die Proportionalität von Bohrarbeit und Bohrlochvolumen auf. Bei verschiedenen Werkzeugen kann man sehr bedeutend verschiedene Bohrlochvolumen mit derselben Arbeitsleistung in dem gleichen Gesteine erzielen.

Bei Conglomeraten, grobem Gneis u. dgl. kann das Experiment den obigen Satz nur im Durchschnitte grösserer Arbeitsleistungen bestätigen; bei in der Masse sehr gleichförmigem Gesteine wird und muss das richtig geführte Experiment eine gute Uebereinstimmung bieten.

## Abscheeren und Lochen.

Das Schneiden von Blech mit der Scheere und das Lochen sind verwandte Operationen. In der Regel bilden die beiden Scheerblätter mit einander beim Schneiden einen Winkel, welcher grösser als Null ist. Wollen wir hier das Gesetz der proportionalen Widerstände zur Anwendung bringen, so haben wir wieder Fälle zu vergleichen, bei welchen die Formänderung übereinstimmend erfolgt, die Werkstücke geometrisch ähnlich sind und die Einwirkung auf dieselben gleichartig erfolgt. Fig. 12 zeigt uns schematisch die Einwirkung zweier Metallscheeren auf zwei geometrisch ähnliche Arbeitsstücke unter gleichen Schneid-, Scheer- oder Kreuzungswinkeln.

Wir haben hier wieder

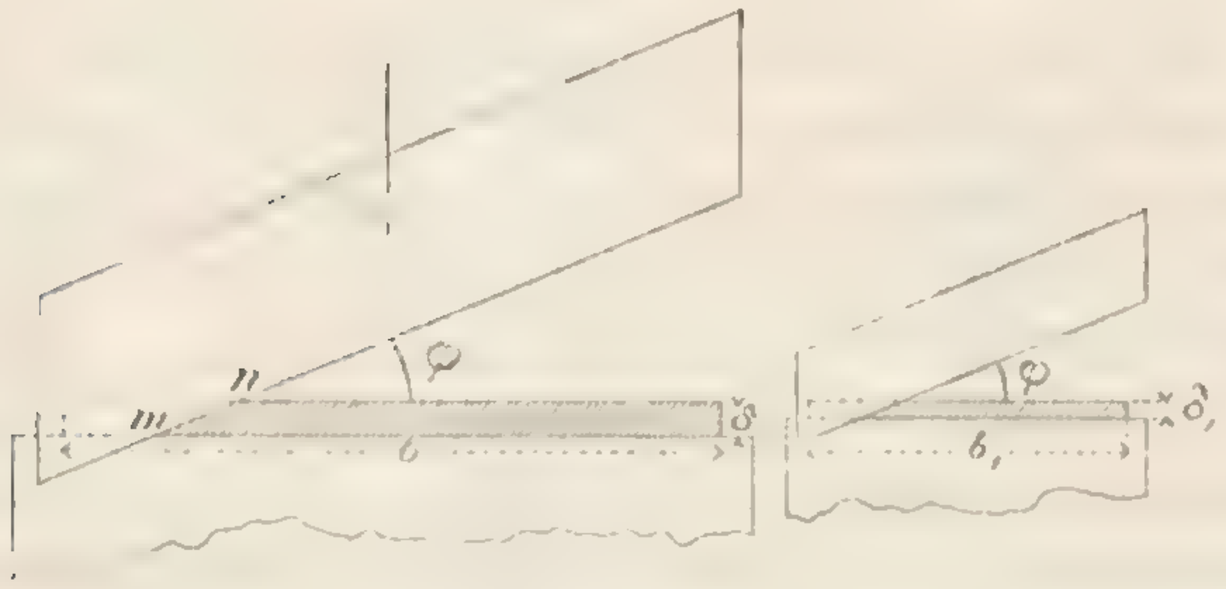
$$A : A_1 = V : V_1$$

und

$$P : P_1 = 1 : a^2 = \delta^2 : \delta_1{}^2.$$

Es wird $P$ von Null bis zu einem bestimmten, von der Länge von $m\,n$, beziehungsweise vom Scheerwinkel $\varphi$ abhängigen Maximum wachsen, dann so lange constant bleiben, als $m\,n$ den gleichen Werth behält, und endlich wieder abnehmen. Für die Praxis ist der Werth dieses Maximums von besonderer Bedeutung und kann auch bei breiteren Blechen mit hinlänglicher Genauigkeit die

Fig. 12.




Arbeit $A = P \,.\, b\,tg\,\varphi$ gesetzt werden. Dieser Maximaldruck $P$ ist nun abhängig von dem Materiale des Werkstückes, dem Schneidewinkel $q$, der Zuschärfung der Scheerblätter, der Genauigkeit ihres Anschlusses und der Blechdicke; hingegen übt die grössere Breite (sobald $b\,tg\,\varphi > \delta$ ist) und die Länge $l$ des Bleches einen sehr geringen Einfluss aus. Für dasselbe Material und die gleiche Scheere gilt demnach die Relation

$$P : P_1 = \delta^2 : \delta_1{}^2,$$

auch dann, wenn $b$ und $l$ beliebige Werthe haben. Hiedurch erhöht sich die Bedeutung, beziehungsweise der Gebrauchswerth dieser Gleichung wesentlich. Man erhält den Satz:

Die zum Schneiden von Blech bestimmten Materiales erforderliche Maximalpressung ist bei bestimmtem Scheerwinkel proportional dem Quadrate der Blechdicke.

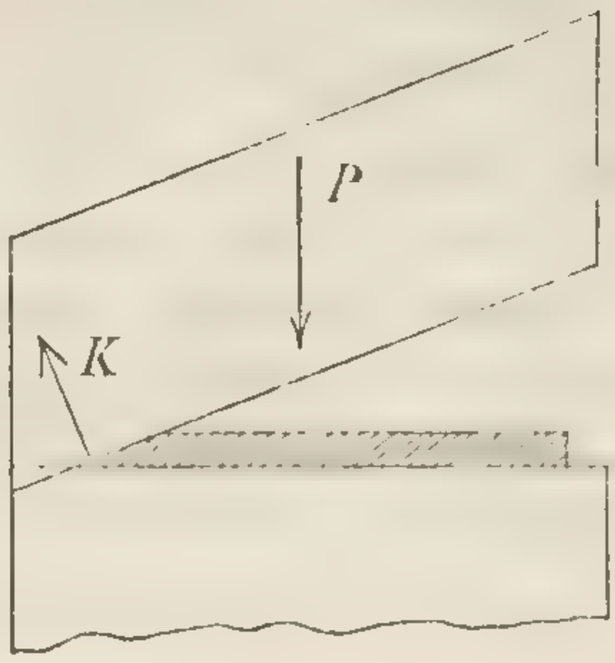
Beträgt für $\varphi = 5^0$ und $\delta = 1$ mm die Pressung $P$ für Eisenblech durchschnittlich 100 kg, so findet man die erforderliche Pressung für denselben Schneidewinkel und die Blechdicke $\delta_1 = 20$ mm zu $20^2 \,.\, 100 = 40000$ kg.

Man hat für verschiedene Materialien und Scheerwinkel versuchsweise die Pressung für 1 mm Blechstärke zu ermitteln und hat hierdurch die Werthe von $P$ für $\delta = 1$ mm gegeben, aus welchen sich für eine gegebene Blechstärke $\delta_1$ der zugehörige Werth $P_1 = P\delta_1{}^2$ bestimmt. (Vergl. Abschnitt V, wo die diesbezüglichen Werthe ermittelt sind.)

Hier mag schon bemerkt werden, dass bei Scheeren mit constantem Scheerwinkel, also mit Verticalbewegung des oberen Scheerblattes, die erforderliche Pressung auch bei guter Führung ganz ausserordentlich durch den Einfluss des Eckens, namentlich bei grösserem Scheerwinkel, beeinflusst wird.

Der Gegendruck $K$ (Fig. 13) ist normal gegen die Schneide gerichtet, er sucht das Scheerblatt mit seinem Schlitten zu verdrehen und veranlasst ein Ecken, dessen Widerstand namentlich bei sehr excentrischer Lage des Bleches sehr bedeutend, ja grösser als der Abscheerungswiderstand sein kann. Ebenso bedeutend ist der Einfluss des mehr minder dichten Anschlusses der Scheerblätter. Macht man die Versuche mit sehr dünnem Bleche, dann kann die Dicke eines Streifchens von Seidenpapier, welches zur Richtigstellung des Anschlusses der Scheerblätter unter eines derselben unterlegt wird, bereits eine Differenz von 20 bis 40 Proc. im Resultate hervorbringen. Diese, die Resultate so sehr beeinflussenden Fehlerquellen gesellen sich zu jenen im Materiale liegenden und erschweren die Aufstellung richtiger Coëfficienten ausserordentlich. Die Schwierigkeiten aller derartigen experimentellen Untersuchungen liegen darin, die Fehlerquellen in ihrer mannigfachen Combination zu erkennen und thunlichst zu beseitigen, sei es durch geeignete Apparate, sei es durch entsprechenden Vorgang beim Experimente selbst.

Fig. 13.




Wird der Scheerwinkel gleich Null, dann treffen alle Punkte des oberen Scheerblattes gleichzeitig auf das zu schneidende Blech. Die Pressung wächst schnell bis zu einem Maximum, bei welchem das Abscheeren erfolgt. Für dasselbe Blech, also gleiches $\delta$, wird

$$P : P' = b : b' \quad \ldots\ldots\ldots \quad (1);$$

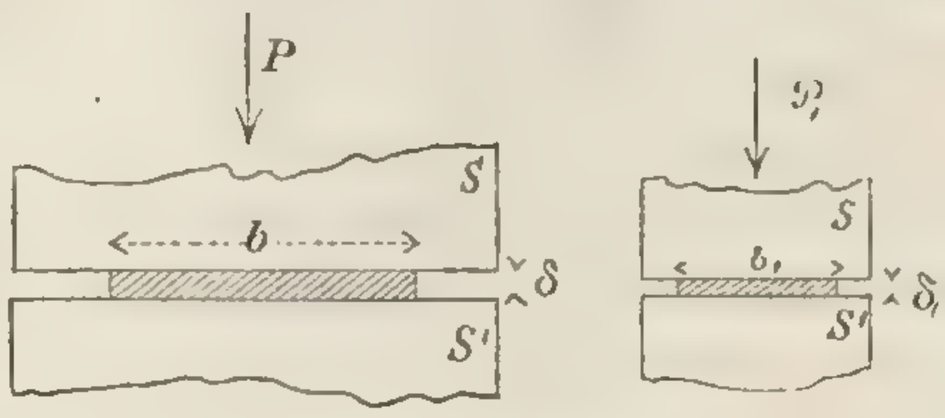
unter $P$ und $P'$ sind die bezüglichen Maximalpressungen verstanden. Das Gesetz der proportionalen Widerstände lehrt hier die Beziehung der erforderlichen Pressungen bei verschiedenen Dicken in nachstehender Weise finden.

Wir erhalten nach Fig. 14, wenn $b : b_1 = \delta : \delta_1$ ist,

$$P : P_1 = \delta^2 : \delta_1{}^2, \quad \ldots\ldots\ldots \quad (2);$$

man ist mithin in der Lage, durch diese Proportion die Maximalpressung für die Breite $b$ und Dicke $\delta$ zu finden, wenn $P_1$ für die Breite $b_1$ und Dicke $\delta_1$ ermittelt wurde. Wählt man nun $\delta_1 = 1$ mm und $b_1 = 1$ cm $= 10$ mm, so findet man für Eisenblech $P_1 = 200$ kg; mithin würde für $\delta = {}^1/_2$ mm und $b = {}^1/_2$ cm $P = 50$ kg, daher für die zehnmal grössere Breite, $b' = 50$ mm, $P' = 50 \,.\, 10 = 500$ kg.

Fig. 14.




Noch einfacher wird die Rechnung, wenn man sie auf die Querschnitte bezieht, denn es ist auch

$$P : P_1 = f : f_1,$$

und hat man durch den Versuch $P_1$ für $f_1 = 1$ bestimmt, so wird

$$P = P_1 f,$$

in welcher Gleichung $P_1$ den Abscheerungs- oder Schubwiderstand per Flächeneinheit darstellt.

Diese Gleichung lässt sich auch für krummlinige Schnitte beim Schneidewinkel Null anwenden, daher auch für das Ausdrücken von Blechscheiben aus Blech, dessen Dicke im Verhältnisse zum Stempeldurchmesser klein ist, also beim Lochen dünnen Bleches.

Beim Lochen dicker Platten ist der Vorgang complicirter. Auf ihn ist allerdings auch das Gesetz der proportionalen Widerstände unmittelbar anwendbar. Es ist, geometrische Aehnlichkeit vorausgesetzt, auch hier:

$$A : A_1 = d^3 : d_1{}^3 = \delta^3 : \delta_1{}^3$$

und

$$P : P_1 = d^2 : d_1{}^2 = \delta^2 : \delta_1{}^2,$$

aber, weil zur geometrischen Aehnlichkeit die Proportionalität von $d$ und $\delta$ gehört, so kann ein Versuch für ein bestimmtes Material nur dann für eine Platte von anderer Dicke den Werth der Arbeit oder der Pressung geben, wenn auch dort $d : \delta$ in demselben Verhältnisse steht. Der Vorgang beim Lochen dicker Platten ist noch viel weniger ein reines Abscheeren, sondern es dringt der Stempel $S$ in grösserem Maasse in das Material ein, als der Bolzen unten austritt. Ein Theil des verdrängten Materiales fliesst, wie Fig. 16 erkennen lässt, zur Seite. Die Ursache dieser Erscheinung liegt darin, dass der Widerstand gegen das Zurseitefliessen der Theilchen geringer ist als der Widerstand gegen das Abscheeren. Würde man den Widerstand gegen das Abscheeren für die Fläche $\pi d \delta$ nach dem früher Gesagten berechnen, so würde man jedenfalls eine Pressung finden, welche grösser ist als die zum Lochen der dicken Platte wirklich gebrauchte Maximalpressung. Wird das Loch durch eine Platte gepresst, welche rund um das Loch auf eine grössere Entfernung hin (etwa gleich dem dreifachen Lochdurchmesser) sich erstreckt, so ist der Widerstand fürs Lochen ein bestimmter und wird nicht wesentlich geändert, wenn die Platte rund um das Loch noch grössere Ausdehnung besitzt. Aus diesem Grunde genügt es für die

Fig. 15.

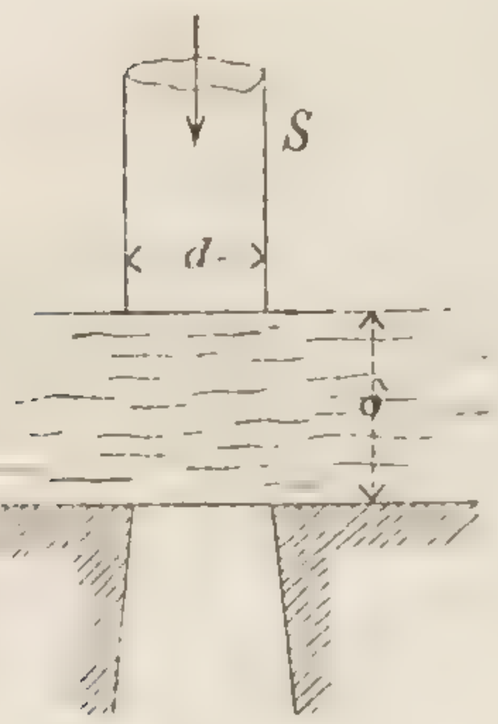
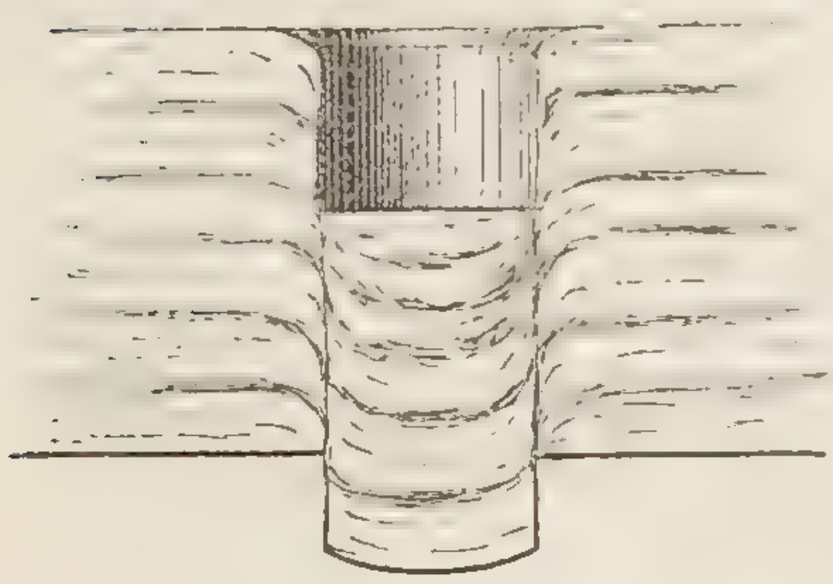



Fig. 16.



experimentelle Feststellung des Widerstandes gegen das Lochen dicker Platten bestimmten Materiales das Verhältniss $d : \delta$ zu verändern, was geschehen kann, wenn (bei constanter Plattendicke $\delta$) nur der Werth des Stempeldurchmessers $d$ geändert wird. Wäre beispielsweise $\delta = 24$ mm und $d = 8, 12, 18, 24$ mm, so ist $\frac{d}{\delta} = {}^1/_3, {}^1/_2, {}^3/_4, 1$.

Man wird vier verschiedene Maximalpressungen

$$P_1, P_2, P_3, P_4$$

finden, welche sich nun nach dem Gesetze der proportionalen Widerstände durch die Proportion

$$P : P_1 = \delta^2 : \delta_1{}^2$$

dazu verwenden lassen, die Grösse der Maximalpressung beim Lochen von Platten anderer Dicken desselben Materiales und gleichen Verhältnisses von $d : \delta$ zu bestimmen.

Die Werthe $P_1$, $P_2$, $P_3$, $P_4$ stehen zu einander bei verschiedenen Materialien in verschiedenem Grössenverhältnisse, daher diese Bestimmungen auch für die verschiedenen Materialien durchgeführt sein müssen. (Vergl. Abschnitt VI.)

Bei den hier besprochenen Versuchen kann dieselbe Platte benutzt werden, daher die Fehlerquellen, welche in der Benutzung von Platten verschiedener Stärke liegen, vermieden sind. Hat man $P_1$ für $d = 8$ mm und $\delta = 24$ mm ermittelt, so ist $P_1'$ für $d = 24$ mm und $\delta = 72$ mm leicht nach obiger Proportion gerechnet; in gleicher Weise kann $P_2'$ und $P_3'$ auf den Stempeldurchmesser von 24 mm bezogen werden, und so lassen sich die vier Maximalpressungen für den Stempeldurchmesser gleich 24 mm und die Plattendicke $\delta = 72, 48, 32$ und 24 mm einfach berechnen.

Man ersieht aus diesem Beispiele, wie sehr das Gesetz der proportionalen Widerstände die Vornahme von Versuchen vereinfacht und erleichtert.

## Schmieden unter dem Dampfhammer.

Die Arbeitsgrösse, welche ein mit Unterdampf arbeitender Dampfhammer pro Schlag abgibt, ist gleich dem Hammergewichte $Q$ mal der Fallhöhe $H$, abzüglich der Reibung, welche etwa 4 Proc. beträgt. Der Schlag kann aber an seinem Arbeitswerthe $QH$ sehr verlieren, wenn der Unterdampf nicht rasch genug auspuffen kann, daher hier ganz besonders auf weite Canäle zu sehen ist.

Ist durch die Erfahrung für ein Schmiedestück bestimmten Gewichtes $G$ der anzuwendende Werth $QH$ bekannt, so findet man nach dem Gesetze der proportionalen Widerstände jene Arbeitsgrösse, welche für ein geometrisch ähnliches Schneidestück vom Gewichte $G_1$ anzuwenden ist, soll dasselbe gleich intensiv bearbeitet werden.

Es ist $A : A_1 = QH : Q_1 H_1 = G : G_1 = 1 : a^3$.

Würde man die Dampfhämmer geometrisch ähnlich und proportional dem Grundverhältnisse $1:a$ der Schmiedestücke bauen wollen, so würde sich $Q:Q_1 = 1:a^3$ und $H:H_1 = 1:a$, demnach $QH:Q_1H_1 = 1:a^4$ verhalten, und man erhielte, wenn von den kleineren zu den grösseren Dimensionen übergegangen würde, viel zu intensive Schläge. Dass Arbeitsmaschinen nicht proportional vergrössert oder verkleinert werden dürfen, ist bekannt. Durch das Gesetz der proportionalen Widerstände aber ist erst jene Grundbeziehung gegeben, nach welcher die Vergrösserung beziehungsweise Verkleinerung zu erfolgen hat.

Wirkt der Dampfhammer mit Oberdampf, dann kommt zu $A = QH$ noch die vom Oberdampf ausgeübte Arbeitsgrösse $A'$ hinzu, man hätte

$$(QH + A') : (Q_1 H_1 + A_1') = G : G_1 ;$$

am Wesen der Beziehung ist hierdurch nichts geändert.

## Werkzeugmaschinen, Pressen, Prägwerke

wirken in der Regel durch ruhigen Druck. Will man statt eines Werkstückes vom Gewichte $G$ ein geometrisch ähnliches vom Gewichte $G_1$ der übereinstimmenden Formänderung aussetzen, oder will man dickere Späne bei übereinstimmendem Gebrauche des Werkzeuges nehmen, dann hat man die Dimensionen auf Grundlage der Gleichung

$$P : P_1 = 1 : a^2 = G^{2/3} : G_1{}^{2/3} = f : f_1$$

zu ermitteln, in welcher $P$ und $P_1$ die auf das Werkstück ausgeübten Pressungen, $1:a$ das Grundverhältniss, $G$ und $G_1$ die Gewichte der Werkstücke, $f$ und $f_1$ die correspondirenden Querschnitte derselben (z. B. der Späne) bedeuten. Welche der drei Proportionen speciell zur Anwendung gebracht werde, bestimmt sich im Einzelfalle sozusagen von selbst, denn man wird jene anwenden, deren Grössen am leichtesten und schärfsten ermittelt werden können.

## Dimensionirung von Panzerplatten.

Eine Panzerplatte von der Dicke $\delta$ widerstehe einem Projectile bestimmter Form vom Gewichte $G$ und der Fluggeschwindigkeit $v$. Hier ist die im Projectile enthaltene Arbeitsgrösse $A = \frac{Gv^2}{2g}$, wobei $g$ die Acceleration der Schwere gleich 9,84, $v$ in Metern, $G$ in Kilogrammen einzusetzen kommt. Nach dem Gesetze der proportionalen Widerstände muss eine geometrisch ähnliche Panzerplatte desselben Materiales der ihrem Volumen proportionalen Arbeitsgrösse Stand halten.

$$A : A_1 = 1 : a^3 = \delta^3 : \delta_1{}^3.$$

Das Verhältniss der dritten Potenzen der Plattendicken wurde hier eingesetzt, da Länge und Breite der Platten von weit geringerem Einflusse sind.

Das Projectil, welches die zweite, in ihrer Dicke zu bestimmende Platte auszuhalten hat, sei dem ersten Projectil geometrisch ähnlich und habe die Fluggeschwindigkeit $v_1$, dann ist

$$A_1 = \frac{G_1 v_1^2}{2g},$$

und man erhält die Relation

$$\frac{G v^2}{2g} : \frac{G_1 v_1^2}{2g} = \delta^3 : \delta_1^3$$

und

$$\delta_1 = \delta \sqrt[3]{\frac{G_2 v_1^2}{G v^2}}.$$

Ist bei Anwendung von Ladungen, welche den Gewichten der Projectile proportional sind, $v = v_1$, so wird

$$\delta_1 = \delta \sqrt[3]{\frac{G_1}{G}}$$

gefunden.

## Walzen und Drahtziehen.

Bei Anwendung des Gesetzes der proportionalen Widerstände auf das Walzen und Drahtziehen muss zu übereinstimmender Formänderung, wie selbe vorausgesetzt ist, die geometrische Aehnlichkeit sowohl bei den Arbeitsstücken als den Arbeitsmitteln (Walzen, Zieheisen) vorhanden sein.

Nur unter dieser Voraussetzung und bei einem Materiale von gleichen Eigenschaften verhält sich

$$A : A_1 = V : V_1 = G : G_1 = 1 : a^3.$$

Zieht man Draht, so ist die verlangte geometrische Aehnlichkeit des Werkzeuges und Werkstückes vorhanden, wenn die Zieheisen geometrisch ähnlich sind und bei ähnlicher Querschnittsform das Abnahmeverhältniss dasselbe ist. Demnach erhält man für das Drahtziehen mit Bezug auf Formel (3) den Satz:

Zum Ziehen eines bestimmten Gewichtes von Draht gleicher materieller Beschaffenheit durch geometrisch ähnliche Zieheisen braucht man bei bestimmtem Abnahmeverhältnisse eine constante Arbeitsgrösse.

Mit Bezug auf Formel (2) könnte man unmittelbar auch die Relation

$$P : P_1 = f : f_1$$

aufstellen und hätte in Worten:

Die Ziehungswiderstände (Zugkraft) beim Drahtziehen durch geometrisch ähnliche Zieheisen verhalten sich bei constantem Abnahmeverhältnisse und gleichem Materiale wie die Querschnitte des zu ziehenden Drahtes.

Dieser Satz lässt sich auch direct aus der Relation

$$A : A_1 = V : V_1$$

mit Berücksichtigung der vorausgesetzten geometrischen Aehnlichkeit ableiten; denn für Drähte von ähnlichem Querschnitte kann man in der obigen

Proportion $V$ und $V_1$ durch $f.l$ und $f_1 l_1$ ersetzen, wobei $f$, $f_1$ die Querschnitte, $l$, $l_1$ die Längen bedeuten. Die Arbeit, auf die Drahtlänge $l$ bezogen, lässt sich durch $P.l$ ausdrücken, und sonach geht obige Proportion über in

$$Pl : P_1 l_1 = fl : f_1 l_1,$$

und dies gibt

$$P : P_1 = f : f_1,$$

wie oben.

Die Ermittelung der Coëfficienten hätte sich mithin auf den Einfluss des Abnahmeverhältnisses und des Materiales zu beziehen; bei letzterem ist der sehr massgebende Einfluss des Hartziehens, also der Veränderung der Eigenschaften, welche dasselbe Material durch den Arbeitsvorgang erleidet, gleichfalls zu ermitteln.

Beim Walzen führt das Gesetz der proportionalen Widerstände zu ganz gleichartigen Sätzen:

Zum Walzen eines bestimmten Gewichtes von Stäben oder Blechen geometrisch ähnlichen Querschnittes gleich widerstandsfähigen Materiales bedarf man mittels geometrisch ähnlicher Walzen bei gleichem Abnahmeverhältniss einer constanten Arbeitsgrösse.

Oder:

Gleiche Gewichte von Stäben desselben Materiales und geometrisch ähnlichen Querschnittes bedürfen beim Walzen durch geometrisch ähnliche Walzen bei demselben Abnahmeverhältnisse der gleichen Walzarbeit.

Der Widerstand, welchen Walzstücke entgegen der Durchgangsrichtung bei geometrisch ähnlichen Querschnitten und Walzen, ferner bei gleichem Abnahmeverhältniss und Materiale äussern, ist proportional dem Querschnitte der Walzstücke.

Beim Walzen parallelepipedischer, breiter Stücke, bei welchen die seitliche Ausbauchung des Walzstückes, wie sie Fig. 17 andeutet, keinen wesentlichen Einfluss auf die aufzuwendende Walzarbeit äussert, darf ohne bedeutenden Fehler angenommen werden, dass die Arbeit, sowie der Widerstand proportional der Breite des Walzstückes wächst. Man kann den für $f = bh$ experimentell gefundenen Werth von $P$ benutzen, um den Werth des Widerstandes $P'$ für die $a$-fache Breite, unter sonst gleichen Umständen (Walzendurchmesser, Material, Abnahmeverhältniss), zu finden. Hierfür wird

Fig. 17.



$$P' = aP = \frac{b_1}{b} P.$$

Nach früher verhielt sich für durchaus ähnliche Verhältnisse

$$P : P_1 = f : f_1 = bh = b_1 h_1,$$

es wird nun

$$P' : P_1 = \frac{b_1}{b} P : P_1 = \frac{b_1}{b} bh : b_1 h_1 = h : h_1.$$

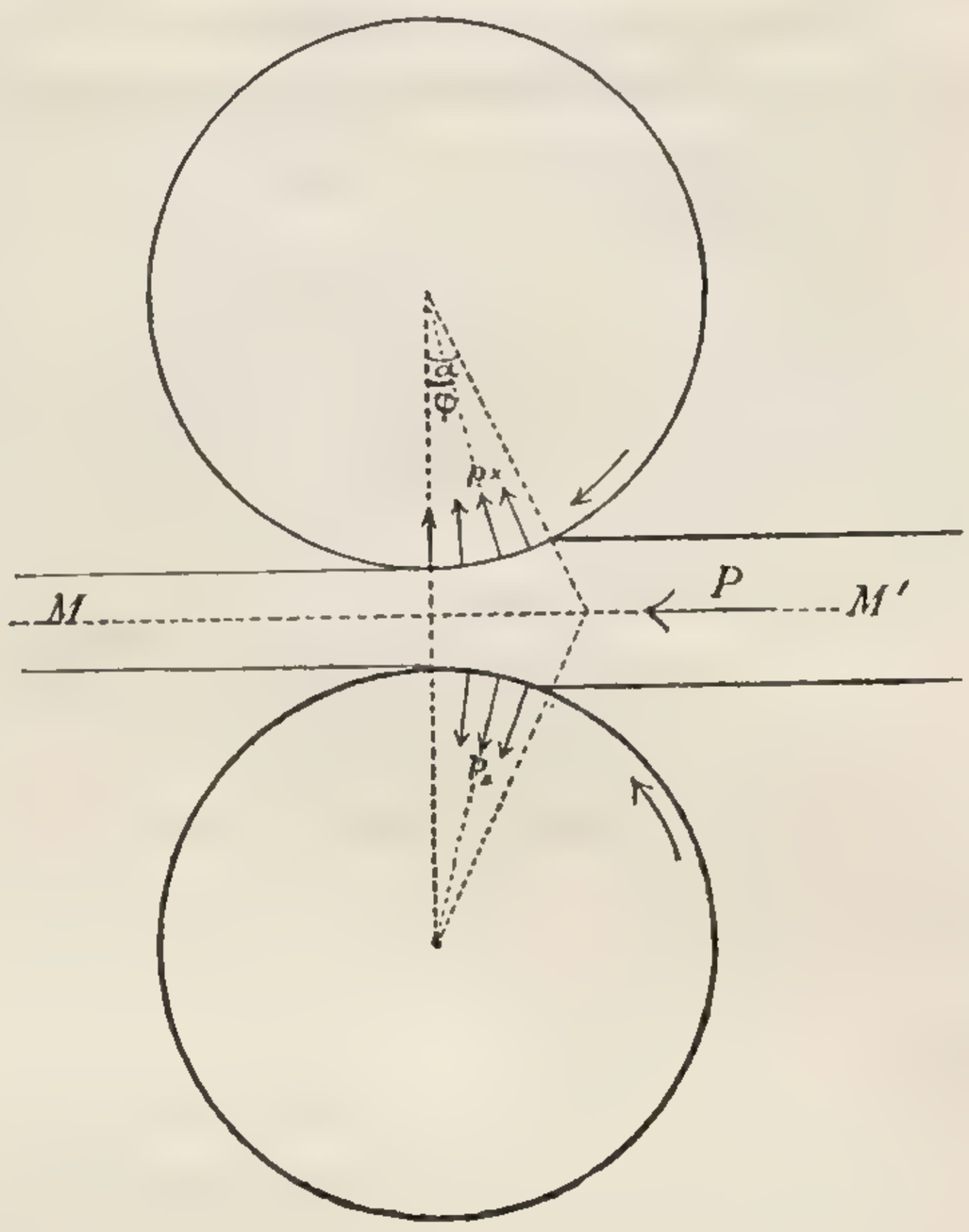
Das heisst aber in Worten:

Bei geometrisch ähnlichen Walzen, gleichem Abnahmeverhältnisse und gleicher Breite der Walzstücke verhält sich deren Widerstand annähernd wie die Höhen der Walzstücke.

Das Wort annähernd bezieht sich darauf, dass der letzten Betrachtung die Voraussetzung zu Grunde lag, dass die seitliche Ausbauchung nur geringen Einfluss auf den Widerstand nehme.

Zwischen Walzenoberfläche und Walzstück herrschen uns unbekannte Pressungen, diese Pressungen bedingen in Verbindung mit der Bewegung der Walzen eine Reibung der Walzen an dem Walzstücke, zufolge welcher dasselbe eingezogen wird. Die Richtung der Reibung kann nur die tangentiale sein, jene der Pressung nur die normale zur Walzenoberfläche in dem bezüglichen Flächenelemente.

Fig. 18.




Es sei $dO$ das Differentiale der Walzenoberfläche, $p_x$ die darauf wirkende uns unbekannte specifische Pressung, $\varrho$ der Reibungscoëfficient, so ist $\varrho p_x dO$ die Grösse der tangentiell am Flächentheilchen $dO$ wirkenden Reibung.

Bei parallelepipedischem, oder überhaupt zur Mittellinie $MM'$ symmetrischem Walzstücke und gleich grossen Walzen findet sich an der Unterseite unter gleichem Neigungswinkel $\varphi$ zur Linie $MM'$ symmetrisch angeordnet ein gleiches Reibungsdifferentiale $\varrho p_x dO$, welche beide eine horizontal gerichtete Resultirende $2\varrho p_x dO \cos\varphi$ geben, während die entgegengesetzt gerichtete Resultirende der Pressung $2 p_x dO \sin\varphi$ beträgt.

Die Summe dieser sämmtlichen Resultirenden ist offenbar gleich der Kraft

$$P = 2\varrho \int p_x dO \,(\cos\varphi - \sin\varphi),$$

denn mit $P$ haben wir jene Kraft bezeichnet, welche als resultirende

horizontale Zugkraft der Walzen aufgefasst werden kann. Für rechteckigen Querschnitt des Walzstückes kann

$$dO = bRd\varphi$$

gesetzt werden, wobei $b$ die Breite des Walzstückes und $R$ den Radius der Walzen bedeutet. Für diesen Fall wird

$$P = 2\varrho bR\int_o^\alpha p_x\,(cos\,\varphi - sin\,\varphi)\,d\varphi \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad (1)$$

Das Abhängigkeitsgesetz zwischen $p_x$ und $\varphi$ ist nicht bekannt, daher lässt sich derzeit das Integral auch nicht auflösen. In einem geometrisch durchaus ähnlichen Falle müsste

$$P_1 = 2\varrho b_1 R_1\int_o^\alpha p_x'\,(cos\,\varphi - sin\,\varphi)\,d\varphi \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad (2)$$

sein. Zufolge des Gesetzes der proportionalen Widerstände hat man

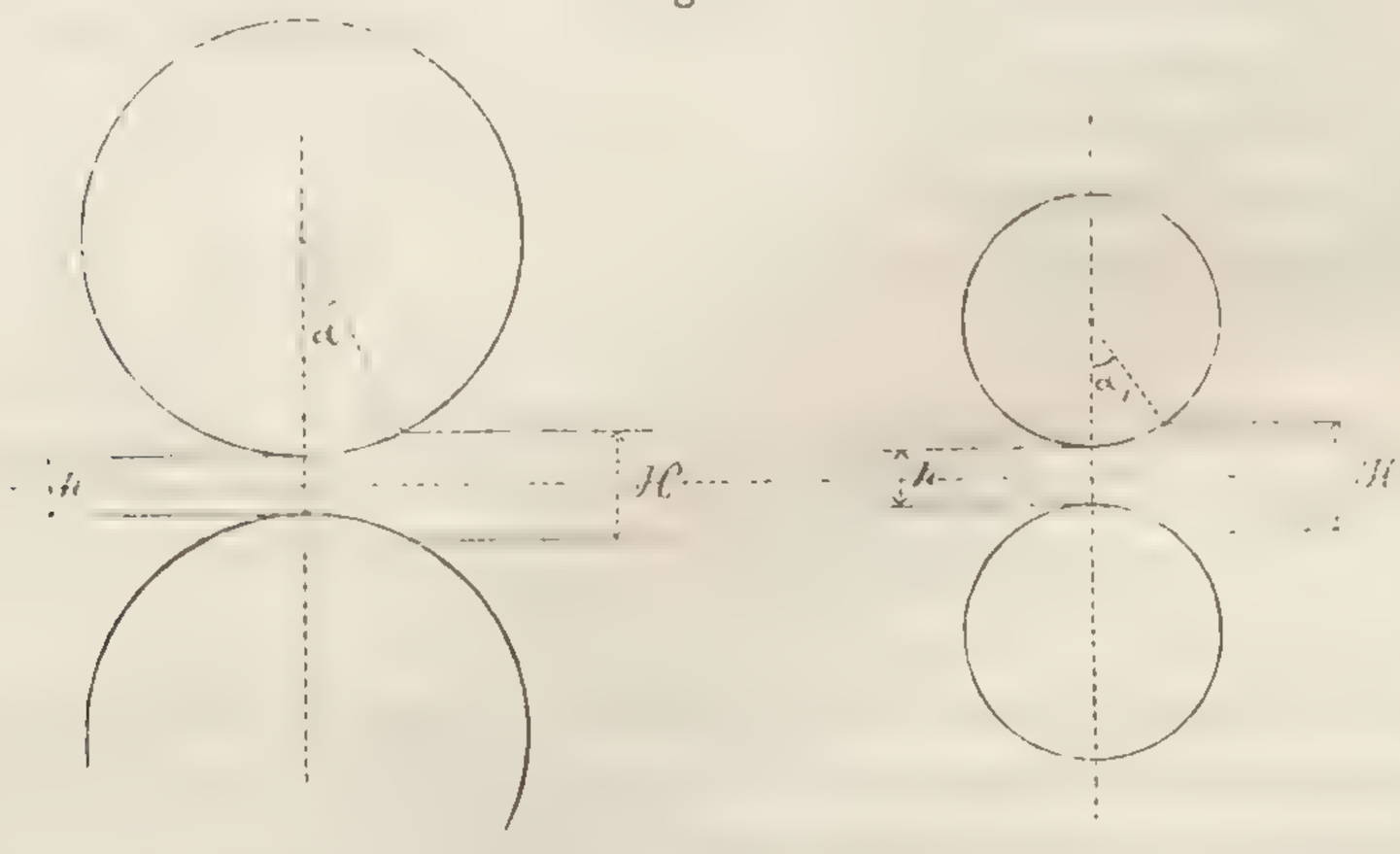
$$P : P_1 = bR : b_1 R_1 = 1 : a^2 \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad (3)$$

(wobei die Dicken gleichfalls im Grundverhältnisse stehen).

Bringt man nun die Relation (3) mit (1) und (2) in Beziehung, so folgt, dass der Werth des bestimmten Integrals in den beiden Gleichungen 1 und 2 derselbe sein muss, was nur dann möglich ist, wenn $p_x = p_x'$, d. h. in Worten:

Bei durchaus geometrisch ähnlichen Verhältnissen sind die specifischen Pressungen an den übereinstimmenden Oberflächenelementen der beiden Walzenpaare, gleiches Material der Walzstücke vorausgesetzt, einander gleich.

Fig. 19.




Das statische Moment, durch welches beide Walzen gedreht werden müssen, ist ausgedrückt durch

$$M = 2\varrho bR\int_o^\alpha p_x\,dq.$$

Betrachten wir nun den Einfluss verschieden grosser Walzenpaare bei demselben Abnahmsverhältnisse auf dasselbe Walzstück. Es unterscheidet sich die Einwirkung der Walzen durch die

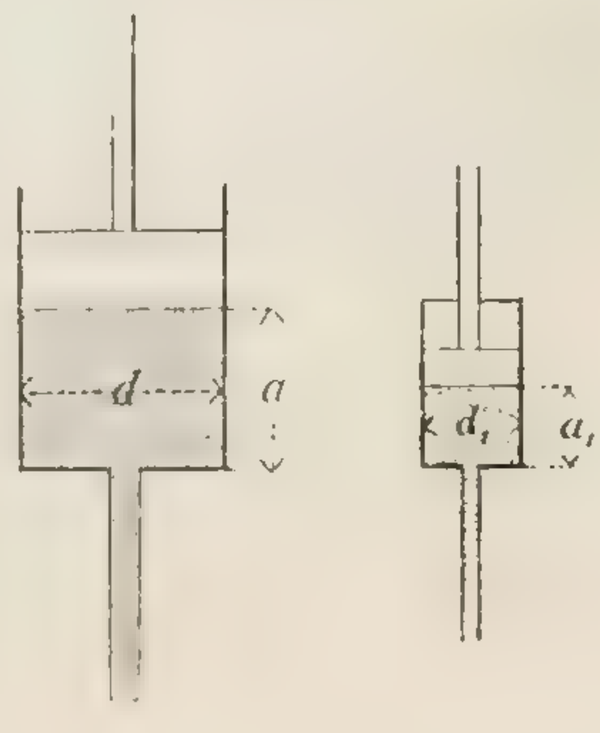
Grösse des Winkels $\alpha$ (Fig. 19), die Pressungen fallen bei den kleineren Walzen schräger aus, *sin* $\alpha$ ist grösser, *cos* $\alpha$ kleiner, mithin ziehen die kleineren Walzen schwieriger ein, strecken aber aus demselben Grunde leichter. Sind die kleineren Walzen überhaupt im Stande, die Formänderung durchzuführen, so muss dies unter geringerem Kraftverbrauche erfolgen, gerade so wie ein Hammer mit schmälerer Bahn leichter streckt, als mit breiterer. Wie gross dieser Einfluss ist, liesse sich bestimmen, sowie das Abhängigkeitsgesetz zwischen $p_x$ und $\varphi$ bekannt wäre. Nachdem nun das Gesetz der proportionalen Widerstände die vollkommene geometrische Aehnlichkeit voraussetzt, so ersehen wir, dass die früheren Sätze nicht mehr Geltung haben, wenn die Walzenradien nicht im Grundverhältnisse stehen. Sind dieselben gleich, so wird bei sonst geometrisch ähnlichen Arbeitsstücken für die kleineren, auch bei gleichem Materiale, verhältnissmässig zu den Gewichten ein grösserer Arbeitsaufwand nöthig.

## Das Auspressen weicher Massen aus Gefässöffnungen.

Werden weiche Massen, welche in einem Gefässe eingeschlossen sind, durch den auf sie wirkenden Druck eines Kolbens gezwungen, durch eine vorhandene Oeffnung des Gefässes auszutreten, so findet nach Treska's umfangreichen Versuchen eine Verschiebung und Bewegung der Massentheilchen statt, welche ihre Analogie in der Bewegung von Flüssigkeiten findet, daher treffend Fliessen genannt wird. Der Ausfluss dieser Massen findet, wie dies durch Anwendung geschichteter Massen leicht erkannt werden kann, mit ausserordentlicher Regelmässigkeit statt. (Vergl. Fig. 6, Taf. I.)

Bei geometrisch ähnlichen Verhältnissen des Gefässes und übereinstimmender Einwirkung erhält man geometrisch ähnliche Formen der Schichtenverschiebungen. Wendet man hierauf das Gesetz der proportionalen Widerstände an, so erhält man mehrere grundlegende Beziehungen, welche sich in folgenden Sätzen ausdrücken lassen.

Fig. 20.




1) Die Pressungen, mit welchen die Kolben in geometrisch ähnlichen Gefässen den Ausfluss gleicher plastischer Massen aus ähnlichen Ausflussöffnungen bewirken, sind in den übereinstimmenden Kolbenstellungen proportional den Kolbenflächen, daher sind die specifischen Pressungen in diesen Stellungen einander gleich.

Es ist hier wohl kaum erforderlich zu bemerken, dass unter übereinstimmender Kolbenstellung jene verstanden ist, bei welcher die Ab-

messungen der unter dem Kolben befindlichen Masse gleichfalls im Grundverhältnisse stehen; mit Bezug auf Fig. 20

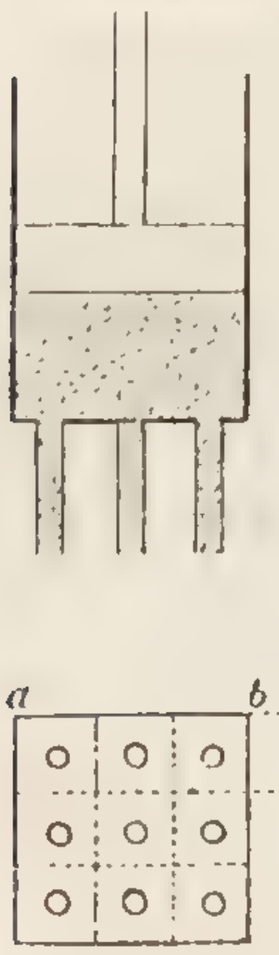
$$a : a_1 = d : d_1.$$

2) Die Arbeitsgrössen, welche den Ausfluss plastischer Massen aus geometrisch ähnlichen Gefässen bei übereinstimmender Einwirkung bewirken, verhalten sich wie die Volumen der Massen oder die Volumen der Ausflusscylinder.

Daher ist auch hier unter Einhaltung der Voraussetzung, aber nur dann, mit gleichen Arbeitsgrössen die gleiche Gewichtsmenge Materials auszupressen, gleichviel welche Querschnittsgrösse der Ausflusszapfen aufweist.

Eine sehr wesentliche, einflussreiche Fehlerquelle liegt in der Reibung des Presskolbens an den Gefässwänden. Die Materialtheilchen pressen sich, namentlich bei Thon, Porzellanmasse u. dgl., zwischen Kolbenumfläche und Cylinder-Innenwand, die Reibung wird bedeutend und ihr Einfluss stört in hohem Grade die Ermittelung richtiger Coëfficienten, auch dann, wenn durch gleichförmiges Material die in diesem liegenden Fehlerquellen beseitigt sind. —

Fig. 21.




Bringt man, wie z. B. Fig. 21 andeutet, mehrere Ausflussöffnungen an, so hat man in Bezug auf den Widerstand gegen Fluss des Materiales einfach die Multiplication. Im vorliegenden Falle bedarf es der 9fachen Pressung als jener, welche für ein Gefäss von quadratischem Querschnitt und $^1/_3$ Seitenlänge ($^1/_3\, a\, b = n$) nöthig wäre. Die Reibungswiderstände aber werden sich hier günstiger stellen, denn die Umfläche ist hier $12\, n$ gegen $36\, n$ der 9 kleinen Pressgefässe. Da die Masse in beiden Fällen mit dem gleichen specifischen Druck zwischen Kolben und Gefässwand zu treten sucht, so wird die Reibung proportional der Fläche zu rechnen sein, daher bei den 9 kleinen Pressgefässen sich dreimal höher stellen.

## III. Abschnitt.

# Theoretische Begründung des Gesetzes der proportionalen Widerstände.*)

Zwei geometrisch ähnliche Körper gleicher Materie werden gleichzeitig so deformirt, dass sie während der Formänderung stets geometrisch ähnlich und alle ihre linearen Abmessungen im Grundverhältnisse $1 : a$ bleiben.

Betrachten wir nun eine unendlich kleine Gruppe von Massentheilchen des einen Körpers während eines Zeitdifferentiales $dt$, so wird im Allgemeinen ein Lagenwechsel dieser Gruppe, dieses Körperdifferentiales, gegenüber den umliegenden Theilchen stattfinden, und gleichzeitig eine Ortsveränderung. Als specielle Fälle sind zu bezeichnen: eine Ortsveränderung ohne Lagenwechsel (Mitbewegung) und Ruhe der betrachteten Theilchen, während andere sich bewegen. Vermöge der vorausgesetzten geometrischen Aehnlichkeit beider in Deformation befindlichen Körper entspricht $dV$ des einen Körpers ein $dV_1$ des zweiten von analoger Lage oder proportionalen Coordinaten, d. h. solchen, welche gleichfalls im Grundverhältnisse stehen, und es ist erlaubt, sich diese Körperdifferentiale in demselben Volumverhältnisse zu denken, in welchem die Körper selbst stehen, also

$$dV : dV_1 = V : V_1 = 1 : a^3,$$

wobei $1 : a$ wieder das Grundverhältniss oder das Verhältniss der analogen, linearen Abmessungen bedeutet.

Bei jedem Lagenwechsel der Theilchen gegen einander sind innere Kräfte zu überwinden. Jedes Massendifferentiale ist durch seine Oberfläche in Verbindung mit den umliegenden Massentheilchen, und die Reactionen treffen naturgemäss die Oberfläche des Theilchens. Auf das Theilchen $dV$ wirkt bei dessen relativer Verschiebung um $ds$ die Reaction $\xi dO$.

Nun nehmen wir an, dass das Theilchen $dV_1$ des zweiten Körpers, dessen Lage durch proportionale Coordinaten $x_1$ $y_1$ $z_1$ gegeben ist, denselben specifischen Widerstand $\xi$ zu überwinden habe; dann muss die Reaction $\xi dO_1$ auf dasselbe wirken.

Die Arbeitsdifferentiale werden sein

$$dA = \xi dO ds$$

und

$$dA_1 = \xi dO_1 ds_1.$$

---

*) Im Wesentlichen wurde dieselbe bereits gegeben in Dingler's polyt. Journal 1883, Bd. 250, S. 141.

Nachdem aber

$$dO_1 = a^2 dO$$

und

$$ds_1 = a ds$$

ist, so erhalten wir

$$dA : dA_1 = \xi dO ds : \xi a^3 dO ds = 1 : a^3.$$

Stehen aber die Arbeitsgrössen zur proportionalen Verschiebung der analogen Massentheilchen, welche in demselben Volumverhältnisse wie die Vergleichskörper stehen, in dem angegebenen constanten Verhältnisse, dann müssen auch die Summen derselben, weil sie gleich viel Summanden besitzen, stets in demselben Verhältnisse stehen. Diese Summen oder Integrale sind die Gesammtarbeiten, welche zur verlangten Formveränderung der geometrisch ähnlichen Körper erforderlich sind; es stehen also diese Arbeiten gleichfalls im Verhältnisse $1 : a^3$ oder $V : V_1$, und mithin wäre unser Gesetz erwiesen, wenn die gemachte Annahme berechtigt war.

Auf jene Arbeitsgrösse, welche zur blossen Ortsveränderung erforderlich war, wurde keine Rücksicht genommen, weil dieselbe gegenüber der Verschiebungsarbeit bei allen festen (nicht flüssigen) Körpern als verschwindend klein zu betrachten ist.

Die oben gemachte Annahme, dass die Massentheilchen analoger Lage bei ihrer übereinstimmenden Verschiebung an den sie umgebenden Theilchen innerhalb desselben Zeitdifferentiales den gleichen specifischen Widerstand $\xi$ zu überwinden haben, wobei sich dieser Widerstand während des Fortschreitens der übereinstimmenden Formänderung bei den beiden Vergleichskörpern beliebig verändern kann, ist gewiss die denkbar einfachste und hat schon daher die Wahrscheinlichkeit für sich. Sie wird noch weiter durch folgende Erwägungen bestätigt. Soll die Aenderung der Form bei beiden Körpern so stattfinden, dass dieselben stets geometrisch ähnlich bleiben, so müssen die analogen Körperdifferentiale in jedem Zeitdifferentiale nach derselben Richtung sich bewegen, beziehungsweise parallele Bahnen durchlaufen; hierzu muss in beiden Fällen ein ganz gleichartiges Kräftespiel stattfinden.

Ist nun auch die Druckvertheilung im Inneren der Versuchskörper unbekannt, so lässt sich von den äusseren Kräften, welche die übereinstimmende Formänderung bedingen, doch behaupten, dass die verlangte analoge Formänderung nur bei gleichartiger Einwirkung dieser Kräfte möglich wird und dass der specifische Druck an den Oberflächen-Elementen übereinstimmender Lage gleich sein muss. Diese Behauptung wird direct durch das Experiment gestützt. Ist dies der Fall, so müssen sich diese äusseren Kräfte der gleichartigen Kräftezerlegung wegen auch so fortpflanzen, dass in irgend einem Punkte $m$ des einen Körpers derselbe active specifische Druck herrscht, wie im analogen Punkte $m_1$ des zweiten Körpers. Herrschen aber in den analogen Punkten $m$ und $m_1$ dieselben activen specifischen Drucke, dann

können auch dieselben inneren specifischen Widerstände überwunden werden. Mithin ist auch hierdurch die obige Annahme gerechtfertigt und unser Gesetz bewiesen, so weit es sich ohne Kenntniss des Wesens der Materie beweisen lässt.

Der Widerstand, welcher der Verschiebung eines Massentheilchens an den Nachbartheilchen entgegensteht, wird in irgend welcher Weise abhängig sein von dem Drucke, mit welchem die Theilchen von oder gegen einander gepresst werden; Bestimmtes über diese Abhängigkeit lehrt das Gesetz der proportionalen Widerstände nicht. Dasselbe besteht, wenn dieser Widerstand sich ausdrücken lässt, durch das Product eines Coëfficienten für innere Reibung mal dem Drucke, welcher zwischen den Theilchen vorhanden ist; es besteht aber auch bei jeder anderen Abhängigkeit, weil der ganzen obigen Betrachtung nichts Anderes als die Annahme zu Grunde liegt, dass die, gleichen specifischen Pressungen ausgesetzten Theilchen analoger Lage auch gleiche specifische Verschiebungswiderstände besitzen. Mithin erhält man über die Natur der Kräfte, welche zwischen den Körperdifferentialen wirken, leider keine näheren Aufschlüsse.

Wäre $\xi = cP$, d. h. gleich dem Coëfficienten für innere Reibung mal der Pressung, so müsste bei gleicher Einwirkung der äusseren Kräfte und übereinstimmender Formänderung bei gleich grossen Versuchsstücken verschiedenen Materiales sich

$$A : A' = c : c'$$

verhalten. Mit Worten: Wäre der innere Widerstand gegen Verschiebung eines Massentheilchens gleich einem constanten Coëfficienten der inneren Reibung mal der Pressung, welche zwischen den sich an einander verschiebenden Theilchen herrscht, so müssten die Arbeitsgrössen, welche zur übereinstimmenden Formänderung zweier geometrisch congruenter Probestücke verschiedenen Materiales gebraucht werden, im constanten Verhältnisse dieser Coëfficienten stehen. Die Versuche lehren, dass dies bei vielen Materialien nicht der Fall ist, dass vielmehr das Verhältniss für die zu den gleichen Formänderungen verschiedener Materialien gleichen Volumens erforderlichen Arbeitsgrössen je nach der Art der Formänderung sehr bedeutend variiren kann. Bei sehr bildsamen Materialien, wie Thon, Porzellanmasse, Glaserkitt, bei welchen eine Flüssigkeit die Materialtheilchen bindet, ist dies weniger auffällig als bei Metallen, wie z. B. Blei und Kupfer.

Noch ist hervorzuheben, dass manche Körper, z. B. Porzellanmasse, aus festen Theilchen mit flüssiger Verbindungmaterie bestehen. Hier functioniren die Körnchen festen Materiales als die Körperelemente, und deren Grösse muss verschwindend klein gegen die Menge des Versuchskörpers sein, wenn das Gesetz der proportionalen Widerstände Geltung haben soll. —

Professor Friedrich Steiner hat vor Kurzem einen Beweis für die Gültigkeit des Gesetzes der proportionalen Widerstände für De-

formationen innerhalb der Elasticitätsgrenze gegeben, welchen wir nachstehend folgen lassen.*)

Wird ein aus elastischen Stäben gebildetes festes System äusseren Kräften $P_1$, $P_2$ u. s. w. (Fig. 22) unterworfen, welche bei der Deformation in Richtung der Kräfte die Wege $p_1$, $p_2$ . . . zurücklegen, und sind $S_1$, $S_2$ . . . die Spannungen, welche hierbei in den einzelnen Stäben von der Länge $l_1$, $l_2$ . . , den Querschnitten $F_1$, $F_2$ . . , den Elasticitätsmoduli $E_1$, $E_2$ . . . entstehen, so muss die Deformationsarbeit $A$ der äusseren Kräfte $P$ gleich jener der inneren $S$ werden, d. h. es müssen die Gleichungen bestehen:

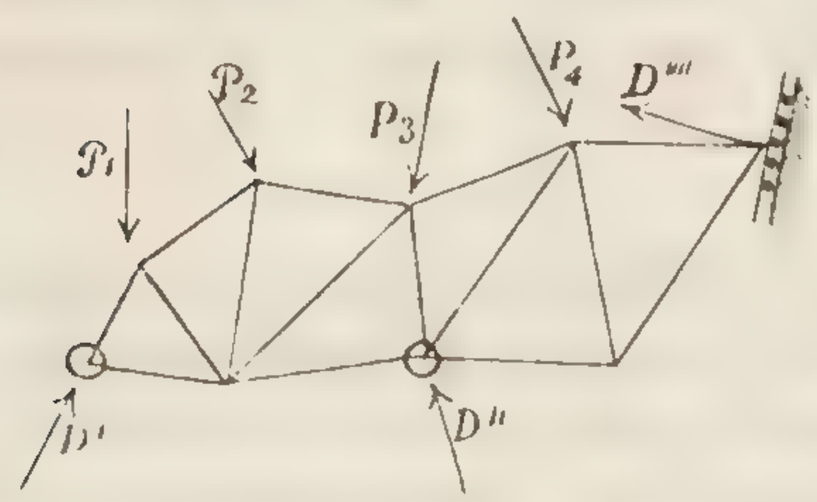
$$A = \frac{P_1 p_1}{2} + \frac{P_2 p_2}{2} + \ldots = \frac{S_1^2 l_1}{2 E_1 F_1} + \frac{S_2^2 l_2}{2 E_2 F_2} + \ldots \quad (1)$$

oder kurz:

$$A = \Sigma \frac{Pp}{2} = \Sigma \frac{S^2 l}{2 E F} \quad \ldots \ldots \ldots \quad (2)$$

Die in den festen und beweglichen Auflagen entstehenden Reactionen $D'$, $D''$, $D'''$ u. s. w. leisten bei starrer Unterlage keine Arbeit. Wir wollen nunmehr zwei einander geometrisch ähnliche Systeme gleichen Materiales $I$ und $I'$ untersuchen und alle auf $I'$ bezüglichen Grössen wie oben bezeichnen, jedoch mit einem Striche versehen und annehmen, dass die Längen des Systems $I'$ $a$ mal grösser als jene des Systems $I$ sind. Unter der Voraussetzung, dass die Körper auch nach der Deformation einander geometrisch ähnlich bleiben, wird:

Fig. 22.

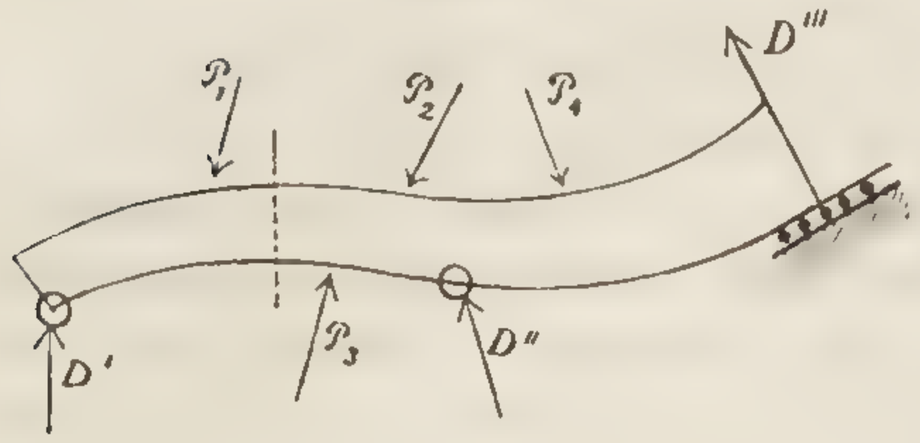



$$\frac{\Delta l'}{\Delta l} = \frac{S' l'}{E F'} : \frac{S l}{E F} = a,$$

woraus sich $S' = a^2 S$ ergibt, da $F' : F = a^2$ sein muss. Für die Deformationsarbeit von $I'$ ergibt sich:

$$A' = \Sigma \frac{S'^2 l'}{2 E F'} = a^3 \Sigma \frac{S^2 l}{2 E F}. \quad (3)$$

Fig. 23.




In ganz analoger Weise hat man für einen massiven Stab (Fig. 23), wenn die Ebene der Kräfte in einer Hauptebene des Stabes bleibt und mit $J$ das Trägheitsmoment des Stabquerschnittes von der Grösse $F$, mit $M$ das Biegungsmoment, mit $N$ die Achsialkraft in einem beliebigen Normalschnitte bezeichnet wird, für die Deformationsarbeit:

$$A = \Sigma \frac{Pp}{2} = \int \frac{M^2 ds}{2 E J} + \int \frac{N^2 ds}{2 E F} \quad \ldots \ldots \quad (4)$$

*) Dingler's polyt. Journal 1884, Bd. 251, S. 289.

Vergleichen wir wieder zwei geometrisch ähnliche Stäbe $I$ und $I'$, so tritt $ds'$ an Stelle von $l'$ in unserer früheren Untersuchung. Soll auch nach der Deformation noch Aehnlichkeit herrschen und sind $\Delta ds$, sowie $\Delta ds'$ die Verkürzungen der Elemente in der Schwerpunktsachse gemessen, so muss:

$$\frac{\Delta ds'}{\Delta ds} = a = \frac{N' ds'}{EF'} : \frac{N ds}{EF},$$

worin $N' = a^2 N$, da $F' : F = a^2$ ist. Ebenso erhält man für die Verdrehung zweier unendlich naher Querschnitte:

$$\frac{\Delta d\varphi}{ds'} : \frac{\Delta d\varphi}{ds} = 1 : a = \frac{M'}{EJ'} : \frac{M}{EJ}.$$

Dies gibt, da $J' : J = a^4$ ist, $M' = a^3 M$; mithin wird die Deformationsarbeit:

$$A' = \int \frac{M'^2 ds'}{2EJ} + \int \frac{N'^2 ds'}{2EF'} = a^3 \int \frac{M^2 ds}{2EJ'} + a^3 \int \frac{N^2 ds}{2EF}.$$

Erwägt man nun, dass in beiden Fällen $V : V' = 1 : a^3$ ist, wenn $V'$ und $V$ die Volumen der Systeme $I'$ und $I$ bezeichnen, und dieselbe Relation für das Verhältniss der Gewichte gilt, so folgt: Die Deformationsarbeiten, welche nothwendig sind, um geometrisch ähnliche elastische Stabsysteme oder beliebig gekrümmte Stäbe gleichen Materiales innerhalb der Elasticitätsgrenze so zu deformiren, dass sie auch nach der Deformation geometrisch ähnlich bleiben, verhalten sich wie die Volumen beziehungsweise Gewichte der Systeme.

Bezeichnet $k$ die specifische Spannung in irgend einem Stabe des Systemes beziehungsweise die specifische Spannung in einem beliebigen Querschnitte des massiven Stabes für ein Flächenelement im Abstande $v$ von der Schwerpunktsachse, so wird für das Stabsystem $k = \frac{S}{F}$ und

$$k' = \frac{S'}{F'} = \frac{S}{F},$$

da $S' = a^2 S$ ist; für den massiven Stab:

$$k = \frac{N}{F} + \frac{Mv}{J}$$

und

$$k' = \frac{N'}{F'} + \frac{M'v'}{J} = \frac{N}{F} + \frac{Mv}{J};$$

d. h. die specifischen Spannungen in homologen Punkten beider Systeme bleiben dieselben. Da

$$A = \Sigma \frac{Pp}{2}$$

und

$$A' = a^3 A = \Sigma \frac{P'p'}{2}$$

ist, so findet man leicht unter Beachtung des Umstandes, dass $p' : p = a$

sein muss, dass sich die deformirenden äusseren Kräfte wie die Quadrate homologer Seiten der ähnlichen Körper verhalten müssen.

Die vorgeführten Sätze ermöglichen, den Zusammenhang zwischen Modell und Ausführung zu überblicken. — Wollen wir die Deformationsverhältnisse eines Balkens $I'$ an einem Modelle $I$, dessen Abmessungen den $n$ten Theil von $I'$ betragen, studiren, so haben wir, um analoge Deformationen zu erzielen, die Belastung $a^2$mal kleiner zu machen. Für $a = 100$ z. B. tritt an Stelle von 1 Tonne des Originals 0,1 kg im Modelle.

Man hat sich jedoch wohl zu hüten, die Deformationsarbeit, welche z. B. das eigene Gewicht des Brückenmodells bei seiner Aufstellung leistet und welche messbare Durchbiegungen erzeugt, mit der Deformationsarbeit der ausgeführten Brücke aus demselben Materiale nach obigem Gesetze vergleichen zu wollen, da in diesem Falle die angreifenden äusseren Kräfte, die Eigengewichte, den dritten Potenzen der homologen Seiten proportional sind. Auf den zweiten Theil des Steiner'schen Artikels, betreffend die Anwendung des Gesetzes auf Flüssigkeiten und Gase, komme ich an anderer Stelle zu sprechen. (Vergl. S. 42.)

## IV. Abschnitt.

# Ueber die experimentelle Auffindung des Gesetzes und hierbei gemachte Erfahrungen.

Der Zweck dieses Abschnittes ist die Mittheilung einiger Erfahrungen, welche sich sowohl für das technologische Experiment als auch in anderer Richtung, vielleicht auch in der Meteorologie verwerthen lassen, und welche einer kurzen Erläuterung, wie sie erworben wurden, werth sein dürften.

Bereits gelegentlich eines Vortrags, gehalten am 2. November 1873 bei der Hauptversammlung des deutschen polytechnischen Vereins in Böhmen*), sprach ich die Ueberzeugung aus, dass die mechanische Technologie auf Grund einer Mechanik der Formänderung aufgebaut werden müsse, dass daher zunächst diese zu schaffen ist. Damals enthielt aber die unter meiner Obhut befindliche Lehrmittelsammlung erst die Anfänge einer kleinen, für den eigenen Gebrauch bestimmten Werkstätte; Apparate für mechanische Versuche fehlten noch gänzlich. So wurden zunächst, nach solchen über Aetzen von Eisen und Stahl**),

*) Techn. Blätter 1873, S. 103.

**) Ebendas., S. 112. Dingler's pol. Journal, Bd. 212, S. 40.

Versuche über Galvanoplastik*) unternommen. Die Abhandlung über die Beziehungen von Druck und Stoss enthielt vorwaltend nur eine Vergleichung der von Anderen gemachten Versuche.**) Erst im Jahre 1876 begann ich mit sehr primitiven, meist selbst und durch Hilfskräfte hergestellten Mitteln die Versuche über die Formänderungen weicher Massen, als welche zunächst Thon, Porzellanmasse, Wachs, Guttapercha, Glaserkitt, geknetetes frisches Brot, Blei, Kupfer, Schweiss- und Flusseisen, glühendes Glas verwendet wurden.

Das Ergebniss mehr als einjährigen Experimentirens war zuvörderst nur die Bestätigung der bereits von Treska gemachten Wahrnehmung, dass alle weichen (bildsamen) Körper, trotz ihrer substantiell so verschiedenen Natur, bei gleichartiger Inanspruchnahme sich der Hauptsache nach gleichartig in der Form ändern, dass daher die Deformationsgesetze bei allen jenen Körpern, bei welchen ein Verschieben oder Fliessen der Theilchen durch Druck erzielbar ist, die gleichen sind.***)

Bei den Experimenten suchte ich zunächst den Vorgang bei möglichst einfachen Formänderungen zu erkennen und glaubte, dass die Zusammendrückung eines Cylinders zwischen parallelen Platten eine solche sei. Es zeigte sich entgegen der Erwartung, dass der Cylinder kein Cylinder blieb, dass sich vielmehr regelmässig die Tonnenform einstellte; dass die Bewegungen der Massentheilchen sehr complicirte seien; dass von einer bestimmten, den Abmessungen des Cylinders entsprechenden rückwirkenden Festigkeit auch bei Metallen, wie Kupfer, Flusseisen nicht gesprochen werden könne, weil diese Materialien fliessen; dass endlich aus den bei diesen Formänderungen ermittelten Zahlenreihen das Gesetz nicht erkannt werden könne. Ja selbst congruente Probestücke gaben z. B. bei Porzellanmasse sehr verschiedene Zahlen. Es wurde speciell dieser Umstand in dem bedeutenden Einflusse selbst geringer Differenzen des Wassergehaltes bei derselben Porzellanmasse, geschweige also bei Massen verschiedener Mischung — man hat zähe und magere Mischungen, mit verschiedenem Kaolingehalte — erkannt. Es wurden nach Bereitung der Versuchsstücke aus wohl „geschlagener“ Masse dieselben bis zum Versuche unter nassgemachten Gläsern aufbewahrt, und nun zeigten sich wieder die unteren Partien weicher, wasserreicher, weil sich bei längerem Stehen das Wasser in den unteren Theilen etwas mehrt, oben mindert, so dass neue Unregelmässigkeiten auftreten, wenn man das Object nicht öfter stürzt. Eine so bedeutende Fehlerquelle das Wasser bei Porzellanmasse ist, eine so bedeutende ist die Wärme bei Wachs. Aber nicht nur die Temperatur des Lokales, auch jene Temperaturerhöhung, welche durch die Formänderung selbst diesem Materiale zugeführt wird, kann Einfluss auf die Widerstände

*) Techn. Blätter 1875. S. 227. Dingler's polyt. Journal, Bd. 218, S. 1.
**) Dingler's polyt. Journ., Bd. 216, S. 377.
***) Ebendas. Bd. 224, S. 465.

nehmen; hierzu gesellen sich die Unvollkommenheiten, welche durch die Herstellung der Probestücke durch Guss bedingt sind. Bei Blei sind es vorzugsweise diese letzteren, welche vollkommen zu beseitigen nicht gelang und deren deutlicher Beweis die buckelige Oberfläche ist, welche ein zusammengedrückter Bleicylinder aufweist.

Noch schlechter ist man daran, wenn man sich die Probeobjecte auswärts bestellt; nur zu leicht bekommt man z. B. statt reinen Bleies Hartblei, statt zähen Kupfers mehr minder sprödes, und in der Regel werden ohne genügende Rücksichtnahme auf den Zweck zur Herstellung kleiner Objecte Rohformen kleineren Querschnittes, z. B. Draht, zur Herstellung grösserer Objecte Stäbe etc. verwendet, und aus dem sauber abgedrehten Stücke ist die Quelle, von der es stammt, dann nicht mehr erkenntlich.

Macht man daher mechanisch-technologische Versuche mit der Absicht, den Einfluss gewisser Dimensionen auf die Formänderungsarbeit zu ermitteln, dann ist es vor allem nothwendig, das Material für die Versuche in grösserer, gleichförmiger Masse zu erwerben, beziehungsweise es sich selbst aus dem käuflichen Rohmateriale herzustellen. Findet diese Herstellung durch Schmelzen statt, und ist die Masse leicht flüssig, dann erhält man sie dicht, wenn, nach dem Gusse in die Form, von oben noch weiter erhitzt wird und die Erstarrung langsam von unten gegen oben fortschreitet. Die Versuchsobjecte sind aus den grösseren Stücken herauszuschneiden, zu sägen, zu drehen. Nur sehr selten und nur dann darf der Hammer zum Strecken benutzt werden, wenn das Material bereits früher intensiver im gleichen Sinne mit dem Hammer bearbeitet worden war, und wenn die neuerliche Bearbeitung in der Glühhitze stattfindet und das Stück nachher ausgeglüht wird.

Aus Zahlenwerthen, welche von Versuchen stammen, bei welchen diese Vorschriften nicht beobachtet wurden, lassen sich keine sicheren Schlüsse ziehen; überhaupt wird man auch aus dem massenhaftesten Zahlenmateriale direct nicht zur Aufstellung von Gesetzen kommen, so lange in den Zahlen der Einfluss mannigfacher Nebenumstände enthalten ist, welche ziffermässig nicht taxirt werden können.

Die Zahlenergebnisse vieler gemachten Versuche wurden graphisch dargestellt, und die mannigfachen Bilder (Diagramme), zu welchen sie selbst bei ganz gleichartigen Versuchsreihen führten, liessen klar erkennen, dass sie von Fehlerquellen oder Nebenumständen sehr beeinflusst und daher zur Ableitung eines Gesetzes nicht geeignet waren.

Als die graphische Behandlung für einige Versuchsreihen bessere Resultate lieferte, wurde versucht, ob die für die einzelnen Stadien der Formänderung durch Druck erforderlichen Pressungen proportional den Querschnitten seien; die Zahlen verneinten dies entschieden. Desgleichen lehnten sie einige andere Muthmassungen ab, bis sich endlich die von Redtenbacher für elastische Formänderungen hervorgehobene Pro-

portionalität der Arbeitsgrössen und der Volumen*) unter der sehr wesentlichen Einschränkung der geometrischen Aehnlichkeit als annähernd zutreffend erwies. Dass die einfache Proportionalität der Arbeitsgrössen und der Volumen nicht für bleibende Formveränderungen Geltung haben konnte, ist klar, weil beim Flusse der festen Körper unter der Einwirkung von Druck verschiedene Arbeitsgrössen auf dasselbe Volumen aufgewendet werden konnten, welche natürlich ihrer Grösse entsprechend auch weiter getriebene Formänderungen zur Folge haben mussten.

Die einfache Proportionalität mit dem Volumen war ausgeschlossen, aber sie konnte immerhin unter einer Einschränkung geometrischer Natur Geltung haben. Als diese Muthmassung beiläufige Bestätigung in den vorhandenen Zahlen gefunden hatte, galt es, die Versuche mit thunlichstem Ausschlusse der Fehlerquellen und solcher Nebenumstände, welche die ziffermässigen Werthe der Versuchsergebnisse beeinträchtigten, speciell dahin einzurichten, die Richtigkeit des vermutheten Gesetzes zu prüfen.

Das Gesetz der proportionalen Widerstände wurde also nicht aus den Versuchszahlen direct abstrahirt, sondern auf Grund von Redtenbacher's Formeln für elastische Deformation entsprang die Idee desselben, und die Zahlen wurden nun darauf geprüft. So dürfte es auch in anderen Richtungen zu halten sein; die Beobachtungsdaten, behaftet mit den mannigfachen Fehlerquellen, beeinflusst von Ursachen, welche unter Umständen nicht klar liegen, geben unmittelbar nicht den Ausdruck der Grundgesetze, es ist vielmehr hier nöthig, Ideen auf ihre Zulässigkeit an vorhandenen Beobachtungs-

---

*) Redtenbacher hat in seinen „Resultaten“ (1. Aufl. S. 34) die Bemerkung gemacht, „dass die Widerstandsfähigkeit der Körper gegen Wirkungsgrössen, also auch gegen die Einwirkung von lebendigen Kräften, bei allen einfacheren Körperformen dem Volumen proportional ist, dass es also nur auf dieses letztere und nicht auf die einzelnen Dimensionen ankommt“. Er sagt ferner: „Genau ist jedoch dieses Gesetz nur dann, wenn die Formänderungen der Körper nicht zu rapid erfolgen, so dass die Einwirkung der lebendigen Kraft Zeit findet, sich über den ganzen Körper zu verbreiten.“ Diese Sätze sind nicht richtig, aber sie gaben mir in Verbindung mit den in Redtenbacher's „Principien“ S. 67, 69 gegebenen Formeln, welche hier folgen, die Anregung zur Auffindung des Gesetzes der proportionalen Widerstände. Jene Formeln sind:

Für die elastische Dehnung

$$A = {}^1/_2 \frac{p^2}{E} V,$$

wobei $p$ die auf die Querschnittseinheit entfallende Spannung und $E$ ein vom Materiale abhängiger Coëfficient ist.

Für die elastische Biegung eines parallelepipedischen Stabes $A = {}^1/_{18} \frac{p^2}{E} V$,

„ „ „ „ „ runden oder elliptischen „ $A = {}^1/_{24} \frac{p^2}{E} V$,

„ „ „ „ „ dreieckigen „ $A = {}^1/_{12} \frac{p^2}{E} V$.

daten zu prüfen und sie nur dann fallen zu lassen, wenn durchaus keine Uebereinstimmung zwischen Idee und Beobachtung gefunden werden kann, oder wenn die Idee bei Grenzfällen oder in deren logischen Consequenzen zu Absurditäten führt. Der grossen Geduld, manuellen Eignung und Umsicht wegen, welche derlei Untersuchungen, namentlich solche zur Controle eines vermutheten Gesetzes, erheischen, sei hier dankend meines Mitarbeiters aus den Jahren 1876—79, des Herrn Assistenten Ferdinand Polak gedacht.

Bei Publication des Gesetzes der proportionalen Widerstände in Dingler's polyt. Journal, Band 234, S. 257 und 345 (1879) — den Namen führte ich übrigens erst später ein — wurde ausdrücklich hervorgehoben, dass das Gesetz für elastische Deformationen jeder Art Geltung habe, indem in Redtenbacher's allgemeiner Formel

$$A = {}^1/_6 \frac{p^2}{\varepsilon} \frac{El}{z}$$

der Theil $\frac{El}{z}$ stets eine Function von drei Dimensionen sei, daher für geometrisch ähnliche Körper

$$\frac{E_1 l_1}{z_1} : \frac{E_2 l_2}{z_2} = V_1 : V_2 = 1 : a^3$$

gesetzt werden könne; dass ferner das Gesetz der proportionalen Widerstände den Redtenbacher'schen Satz der Proportionalität der Arbeitsgrössen mit den Volumen auf geometrisch ähnliche Körper beschränke; andererseits aber erweitere auf jede Körperform und jede Formänderung, vorausgesetzt, dass selbe mit gleicher Geschwindigkeit und so erfolge, dass beide Körper geometrisch ähnlich bleiben.

In einem am 29. November 1879 im Oesterr. Ingenieur- und Architekten-Verein gehaltenen Vortrage*) wurden mehrere Anwendungen des Gesetzes gegeben, zugleich aber hervorgehoben, dass weit wichtiger als diese die durch das Gesetz gebotene Möglichkeit ist, „aus Versuchen im Kleinen rechnungsmässige Schlüsse auf den Arbeitsaufwand im Grossen ziehen zu können. Dies ermögliche ein rationelles, technologisches Experimentiren ebensowohl, wie die Einführung der Wage zu einem vernünftigen chemischen Experimentiren den Weg eröffnete."

Aus diesen Citaten ist ersichtlich, dass die Bedeutung des Gesetzes und seine allgemeine Anwendbarkeit von Anfang an erkannt wurde, und dadurch ist auch die Zähigkeit erklärt, mit welcher auf Erkennung der Ursachen der vorgekommenen Abweichungen der Experiments-Ergebnisse von den Resultaten, welche dem Gesetze zufolge eintreten sollten, hingearbeitet wurde. „Es stimmt nicht" war eine nicht seltene Klage; wer sich aber mit ähnlichen Arbeiten befasste, wer z. B. aus derselben Stabeisenstange mehrere congruente Probestücke für Zerreissproben herstellte und doch nicht dieselben Resultate erhielt, für den werden die nach-

*) Zeitschr. d. österr. Ing.- u. Arch.-Ver. 1880, Heft III.

stehenden Versuchsergebnisse eine so vollständige Bestätigung des Gesetzes sein, wie eine solche auf experimentellem Wege nur immer erlangt werden kann.

So wenig die Natur sich nach vorgefassten Meinungen richtet und so sehr jede theoretische Erwägung der experimentellen Bestätigung bedarf, wenn sie nicht eine logische, ganz unzweifelhafte Consequenz längst geprüfter Erfahrungssätze ist, so wenig darf der Einfluss von Nebenumständen abhalten, von ihnen losgeschälte Grundsätze zu suchen und trotz ihrer an denselben festzuhalten.

Zum Schlusse dieser Betrachtungen sei ganz besonders betont, dass genauere Resultate sich stets leichter durch die Arbeit mit sehr kleinen, nur wenige Gramm schweren Probestücken erzielen lassen als mit grossen. Man muss nur die Mittel für exactes Messen und gute Apparate besitzen. Die Fehlerquellen mehren sich wesentlich beim Experimente mit grossen Stücken.

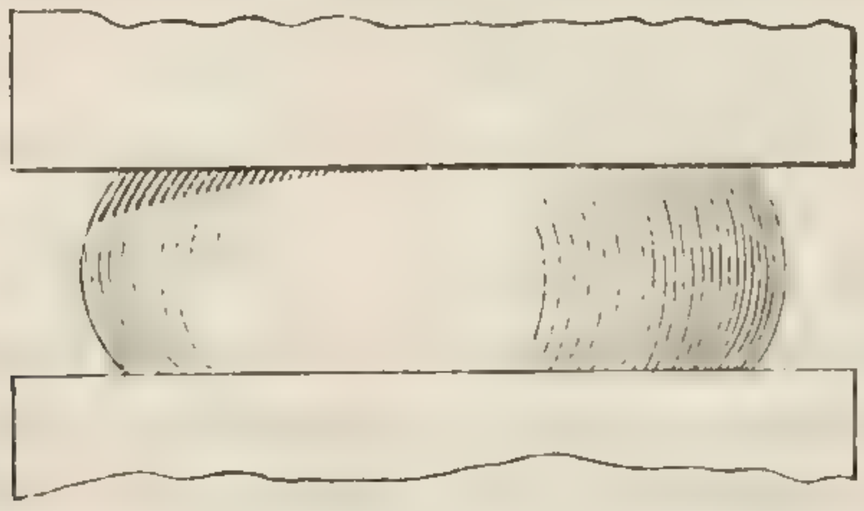
Eine Analogie finden wir in der analytischen Chemie, welche auch mit begründeter Vorliebe kleine Materialmengen der Analyse unterwirft, weil hierdurch genauere Werthe gefunden werden als bei der Untersuchung grosser Mengen.

## V. Abschnitt.

# Begründung des Gesetzes der proportionalen Widerstände durch das Experiment.

### 1. Druckprobe. Zusammendrückung zweier geometrisch ähnlicher Cylinder aus bildsamer Porzellanmasse zwischen horizontalen Platten.

Fig. 24.



Cylinder I { Höhe 66 mm. / Durchm. 51 mm. }  Cylinder II { Höhe 44 mm. / Durchm. 35 mm. }

Es verhält sich $51 : 66 = 35 : 45{,}3$, beide Cylinder sind also nahe geometrisch ähnlich.

Bei der Formänderung ergeben sich die aus folgender Tabelle ersichtlichen Werthe:

| Cylinder I | | Cylinder II | | | |
|---|---|---|---|---|---|
| Zusammendrückung oder Höhenabnahme $s_1$ in Millim. | Belastung (Verticaldruck) $Q_1$ in Kilogr. | Zusammendrückung oder Höhenabnahme $s_2$ in Millim. | Belastung (Verticaldruck) $Q_2$ in Kilogr. | $s_2 \times \frac{51}{35}$ | $Q_2 \times \left(\frac{51}{35}\right)^2$ in Kilogr. |
| 0,5 | 0,5 | 1 | 0,5 | 1,45 | 1,05 |
| 2,0 | 1 | 2,8 | 1 | 4,0 | 2,1 |
| 3,3 | 2 | 5,5 | 2 | 8,0 | 4,2 |
| 5,5 | 3 | 10,0 | 3 | 14,5 | 6,3 |
| 7,8 | 4 | 14,3 | 4 | 20,7 | 8,4 |
| 10,0 | 5 | 18,6 | 5 | 26,9 | 10,5 |
| 12,8 | 6 | 21,9 | 6 | 31,7 | 12,6 |
| — | 7 | 23,0 | 7 | 33,3 | 14,7 |
| 18,5 | 8 | 24,0 | 8 | 34,8 | 16,8 |
| 22,9 | 9 | — | 9 | — | 18,9 |
| 25,0 | 10 | 27,0 | 10 | 39,1 | 21,0 |
| 31,5 | 12 | | | | |
| 35,5 | 15 | | | | |
| 39,8 | 20 | | | | |

Aus diesen Versuchsdaten lassen sich die Arbeitsdiagramme construiren.

Wir tragen für den ersten Versuch die Zusammendrückungen als Abscissen und zwar in doppelter Grösse auf, als Ordinaten die Pressungen für je 1 kg mit 5 mm; hierdurch erhält man die Linie I in Fig. 3, Taf. I.

Das Diagramm für den zweiten Versuch, in gleicher Weise gezeichnet, liefert die Linie II. Wenn wir aber die Abscissen ($s_2$) mit dem constanten Verhältnisse $\frac{51}{35}$ und die Ordinaten ($Q_2$) mit dem Quadrate dieses Verhältnisses, also mit $\left(\frac{51}{35}\right)^2$ multipliciren, so führen wir die Linie II in eine Linie II′ über, welche, wenn das Gesetz der proportionalen Widerstände richtig ist, mit der Linie I zusammenfallen sollte. Unsere Figur zeigt, dass dies mit grosser Annäherung der Fall ist.

Die von der Abscissenachse und der Curve I eingeschlossene Fläche $OBCO$ entspricht der gebrauchten Arbeit $A_1$, jene von II′ eingeschlossene Fläche der Arbeit $A_2 \left(\frac{51}{35}\right)^3 = A_1$, wie es sein sollte.

Bis zur Ordinate $mn$ können beide Curven I und II′ als zusammenfallend betrachtet werden, darüber hinaus findet wohl eine Abweichung statt; aber diese Unregelmässigkeit erklärt sich hinlänglich durch Unvollkommenheiten im Versuche, herrührend von den an der Umfläche der Probestücke bei so bedeutender Zusammendrückung auftretenden Rissen (Berstungen), durch die bedeutende Wasserabnahme in den

centrischen, stark gepressten Partien, sowie durch kleine Fehler gegen die geometrische Aehnlichkeit.

Es sollten allerdings sowohl die Risse, als die Wasserabnahme in den centrischen Partien bei der stets geometrisch ähnlich bleibenden Gestalt beider Versuchsstücke zufolge der in den correspondirenden Theilen gleich grossen specifischen Pressung gleichfalls übereinstimmen; aber es ist bei dem gewählten Versuchsmateriale nicht möglich, alle Unvollkommenheiten zu beseitigen.

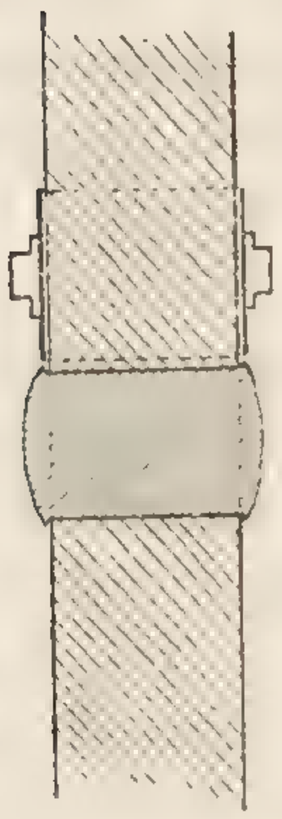
Die Fehlerquelle, welche die am Anfange auftretenden Risse bedingen, lässt sich dadurch beseitigen, dass man den Cylinder aus bildsamer Masse zwischen zwei Metallcylindern gleichen Durchmessers presst, längs welchen in kurzen Zwischenräumen eine Blechhülle verschoben wird, die den vorragenden Massewulst häufig abschneidet. Die durch die Wasserabnahme bedingte Fehlerquelle lässt sich aber nicht beheben, auch dann nicht, wenn man Massen wählt, welche, wie Modellirthon, das Wasser inniger festhalten. Wird z. B. dieser von 25 mm auf 2 mm Höhe zwischen Platten von 50 mm Durchmesser gepresst, wobei der erforderliche Druck von 7 kg auf 100 kg wächst, und untersucht man die zwischen den Presscylindern verbliebene Thonschichte, so ist sie um das Centrum sehr hart, fast trocken und nimmt gegen aussen an Weichheit und Feuchtigkeit zu. Hätte man diese Formänderung in sehr kurzer Zeit, z. B. durch einen Schlag bewirkt, so wäre die Wasserabnahme in der Mittelpartie des Materiales kaum merklich; hier hat daher auch die Zeit einen sehr bedeutenden Einfluss. Mit Rücksicht auf den Einfluss der Zeit ist es geradezu erklärt, warum sich die Linie II' über die Linie I gegen das Ende des Versuches erhebt; die Mittelpartie wurde bei dem Versuche mit der kleineren Materialmenge verhältnissmässig trockener als bei dem grösseren Stücke.

### 2. Zusammendrückung zweier geometrisch ähnlicher Cylinder aus plastischer Masse zwischen Metallcylinderpaaren, deren Durchmesser im selben Grundverhältnisse standen, unter steter Wegnahme des ausgepressten Materiales.

Als Material wurde zu diesen Versuchen gut geknetetes, von der Rinde befreites, frisches Brot verwendet. Dieses Material erwies sich innerhalb der Dauer des Versuches als sehr constant. Auf den oberen Presscylinder (Fig. 25) war ein gut passendes Weissblechrohr aufgeschoben, und sowie einiges Material ausser die Druckflächen trat, wurde dasselbe durch Verschieben des Blechrohres entfernt, das Blechrohr wieder emporgezogen und der Versuch fortgesetzt. Der Fehler bei den Ablesungen der zurückgelegten Wege erreichte nicht 0,2 mm, jener der Pressungen bei Benutzung des Apparates Fig. 1 und 2, Taf. III, betrug in Folge der nicht ganz gleichen, zusätzlichen Reibung bei den höheren Pressungen etwa 3 Proc., bei den kleineren Pressungen etwas

mehr. Dennoch sind die Versuchsangaben bei den höheren Pressungen nicht so genau, weil die Druckflächen nicht vollkommen parallel blieben. Bei dem geringen Endabstande von 0,4 mm betrug die Differenz in der Dicke der auf der Druckfläche verbliebenen Schichte ca. 0,2 mm, und hiervon mussten die Angaben natürlich beeinflusst sein.

Fig. 25.



Durch graphische Darstellung der nachstehenden Versuchszahlen erhält man die drei Diagramme I, II und II′ in Fig. 4, Taf. I; I und II′ decken sich wieder nahezu. Ein völliges Zusammenfallen der Diagrammlinien ist bei Versuchen mit solchen Materialien ebenso wenig zu erzielen wie völlige geometrische Aehnlichkeit. Die wesentlichste Fehlerquelle ist die geringe Abweichung (0,2 mm) in dem Parallelismus der Pressplatten.*)

| I Durchmesser 50 mm. Ursprüngl. Höhe 38,3 mm. | | II Durchmesser 30 mm. Ursprüngl. Höhe 22,7 mm. | | | |
|---|---|---|---|---|---|
| Entfernung der Druckplatten $h_1$ mm | Belastung $Q_1$ kg | $h_2$ mm | $Q_2$ kg | Umgerechnet $h_2 \times 5/3$ | $Q_2 \times (5/3)^2$ |
| 30,5 | 6 | 21,0 | 2 | 35 | 5,5 |
| 24,0 | 6 | 17,8 | 2 | 29,6 | 5,5 |
| 19,0 | 7 | 13,0 | 2 | 21,6 | 5,5 |
| 17,0 | 7 | 11,9 | 2,7 | 18,2 | 7,5 |
| 14,0 | 7 | 9,0 | 3 | 15,0 | 8,2 |
| 11,0 | 9,25 | 8,0 | 3,1 | 13,3 | 8,6 |
| 8,9 | 10 | 7,0 | 2,9**) | 11,7 | 8,2 |
| 7,7 | 11 | 6,0 | 3,2 | 10,0 | 9,0 |
| 6,2 | 12,25 | 5,0 | 3,5 | 8,3 | 9,7 |
| 5,0 | 16 | 4,0 | 4,2 | 6,6 | 12,0 |
| 4,0 | 17 | 3,0 | 6,5 | 5,0 | 18,1 |
| 3,4 | 18 | 2,0 | 10,0 | 3,3 | 27,7 |
| 3,0 | 21,5 | 1,5 | 13 | 2,5 | 36,1 |
| 2,5 | 26,0 | 1,0 | 20 | 1,7 | 55,5 |
| 2,0 | 31,0 | 0,8 | 25 | 1,3 | 69,4 |
| 1,7 | 36 | 0,6 | 30 | 1,0 | 83,3 |
| 1,3 | 46 | 0,4 | 37 | 0,6 | 103 |
| 1,1 | 56 | | | | |
| 0,9 | 66 | | | | |
| 0,6 | 86 | | | | |
| 0,4 | 106 | | | | |

*) Die beiden letzten Versuche wurden zuerst in Dingler's polyt. Journal 1879, Bd. 234, S. 262—264 veröffentlicht.

**) Diese kleinere Zahl ist wohl nur durch den Einfluss des Abtrennens des ausgeflossenen Materiales zu erklären.

### 3. Zusammendrückung von geometrisch ähnlichen Kupfercylindern zwischen parallelen Platten.

Die diesbezüglichen Versuche wurden auf der Festigkeitsmaschine Professor Gollner's unter dessen freundlicher Mitwirkung vorgenommen. Der Cylinder $C_1$, 18 mm hoch, 18 mm im Durchmesser und 40,42 g schwer, wurde zuerst der Zusammendrückung unterworfen. Die beistehende Tabelle liefert hierfür in den ersten drei Columnen die Werthe von $Q$, $h'$ und $d'$, wobei $h'$ die unter der Pressung $Q$ verbleibende Höhe, $d'$ den Durchmesser des Mittelschnittes bedeutet. Zur Controle wurden acht weitere Cylinder desselben Materiales und gleicher Abmessungen, deren Gewichte wenig abwichen, jenen Belastungen unterworfen, welche aus der Tabelle gleichfalls ersichtlich sind, und gaben nahezu dieselben Deformationen, so dass die ausserordentliche Homogenität des Materiales erwiesen ist, welches Stehbolzen-Stangen-Kupfer aus der Fabrik von Chaudoir in Simmering bei Wien war.

| Pressung | Höhe $h'$ | Mittl. Durchm. $d'$ | Acht Control-Cylinder: Höhe $h'$ | Gewicht |
|---|---|---|---|---|
| kg | mm | | | |
| 500 | 17,85 | | | |
| 1 500 | 17,75 | | | |
| 2 000 | 17,70 | | | |
| 2 250 | 17,60 | | | |
| 2 500 | 17,5 | | | |
| 3 000 | 17,4 | | 17,6 | 40,43 |
| 3 500 | 17,3 | | — | — |
| 4 000 | 17,1 | 18,45 | — | — |
| 5 000 | 16,8 | 18,7 | 17,0 | 40,54 |
| 6 000 | 16,4 | — | — | — |
| 7 000 | 15,9 | 19,4 | 16,2 | 40,47 |
| 8 000 | 15,4 | — | — | — |
| 9 000 | 14,8 | 20,1 | 15,1 | 40,55 |
| 10 000 | 14,4 | — | — | — |
| 11 000 | 13,8 | 21,10 | 13,9 | 40,55 |
| 12 000 | 13,3 | — | — | — |
| 13 000 | 12,6 | 22,25 | 12,65 | 40,44 |
| 14 000 | 12,1 | — | — | — |
| 15 000 | 11,6 | 23,15 | — | — |
| 16 000 | 11,2 | — | 11,07 | 40,55 |
| 17 000 | 10,8 | 24,15 | — | — |
| 20 000 | 9,7 | 25,4 | 9,67 | 40,59 |

Die schöne Uebereinstimmung der Control-Versuche mit dem Hauptversuche zeigt sich ganz besonders klar aus der graphischen Darstellung dieser Versuche Fig. 1, Taf. I, Linie $A$, Punkte 1 bis 7.

Aus dem gleichen Materiale wurde ein Kupfercylinder angefertigt, dessen Abmessungen waren:

$$h = 10{,}0 \text{ mm}, \; d = 10{,}0 \text{ mm}, \; G = 6{,}96 \text{ g}.$$

Dieser geometrisch ähnliche Cylinder wurde nach dem Gesetze der proportionalen Widerstände jener Pressung unterworfen, welche der Pressung von 20000 kg auf den Cylinder von 18 mm Höhe und 18 mm Durchmesser entspricht, d. i.

$$Q : 20000 = 10^2 : 18^2$$

oder

$$Q = 6173 \text{ kg.}$$

Die dadurch bedingte Zusammenpressung ergab die Höhe $h' = 5{,}4$, welche sich auch aus der Proportion

$$9{,}7 : x = 18 : 10,\ x = 5{,}4,$$

genau ergibt.

Aehnliche Versuche wurden mehrere, auch mit einem Cylinder von

$$15{,}1 \text{ mm} = h \text{ und } 15{,}1 \text{ mm} = d,\ G = 23{,}95 \text{ g},$$

ausgeführt, und hierdurch einerseits das Gesetz der proportionalen Widerstände in ausgezeichneter Weise durch den Versuch bestätigt, andererseits konnten die mit den kleinen Cylindern erhaltenen Resultate dazu benutzt werden, das für den Cylinder $C_1$ gefundene Diagramm über die mit Gollner's Maschine erreichbare Maximalpressung von 20000 kg hinaus dadurch zu ergänzen, dass die für die kleineren Probestücke ermittelten Deformationen und Pressungen nach jenem Gesetze auf das grössere Probestück umgerechnet werden. Hiedurch ergaben sich die Punkte $n_1$, $n_2 \ldots n_5$ der Fig. 1, Taf. I.

## 4. Versuche über Druckfestigkeit geometrisch ähnlicher Prismen, Cylinder etc. aus Stein u. dgl.

Im sechsten Hefte der Mittheilungen aus dem mechanisch-technologischen Laboratorium der polytechnischen Schule in München berichtet Prof. Bauschinger, dass schon Rondelet in seinem Werke: l'art de bâtir, 13. ed., T. IV, p. 146—154 darauf hinweist, dass schon vor ihm von Gauthey, Soufflot und Perronnet Versuche angestellt wurden, welche darthun, dass für Prismen von geometrisch ähnlicher Gestalt die zum Zerdrücken erforderlichen Belastungen den Querschnittsflächen proportional sind.

Rondelet machte drei Versuchsreihen mit drei verschiedenen Arten von Steinen, von denen er je vier Paar Würfel herstellen liess, deren Seiten 3, 4, 5 und 6 cm massen.

Das Mittel der auf 1 q cm Fläche bezogenen Druckfestigkeit betrug für jedes Paar der Würfel

| | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|
| bei der ersten Versuchsreihe | 269, | 266, | 266, | 271 | kg, |
| „ „ zweiten „ | 117, | 114, | 125, | 123 | „ |
| „ „ dritten „ | 55, | 55, | 55, | 56 | „ |

Die Uebereinstimmung ist mithin eine vorzügliche.

In demselben Hefte der Bauschinger'schen Mittheilungen heisst es Seite 2, dass Vicat den vorerwähnten Satz bereits 1833 dahin erweiterte, dass für geometrisch ähnliche Körper überhaupt

die auf ähnliche Art wirkenden Belastungen, welche den Bruch durch Zerdrücken herbeiführen, proportional den Quadraten der homologen Seiten sind.*)

Vicat führte zum Beweise eine Reihe von Versuchen mit Würfeln, Prismen, Pyramidenstumpfen, Cylindern und geometrisch ähnlichen Körpern, welche aus geometrisch ähnlichen Stücken zusammengesetzt waren, durch, welche im Anschlusse an die von Bauschinger bereits gekürzte Form hier wiedergegeben werden.

### a) Für würfelförmige Körper.

Drei Würfel aus Gyps, deren Seiten 1,0, 1,2, 2,2 cm betrugen, so dass sich die Quadrate der Seiten verhalten wie

$$1{,}00 : 1{,}44 : 4{,}84,$$

wurden zerdrückt bei den Belastungen 42,21, 58,47, 166,82, welche sich verhalten wie

$$1{,}00 : 1{,}38 : 3{,}95.$$

Zwei Würfel aus lufttrockenem Ziegelthon, deren Seiten 1 und 2 cm maassen, wurden durch 33,45 bezw. 133,79 kg zerdrückt, die sich genau verhalten wie 1 : 4.

Zwei Würfel aus feinem Sandstein, deren Seiten 1 und 2 cm maassen,

$$f : f_1 = 1 : 2{,}25,$$

wurden durch 53,10 bezw. 117,10 kg zerdrückt; es verhalten sich

$$P : P_1 = 1 : 2{,}20.$$

Zwei Würfel aus Mörtel von fettem Kalk und gewöhnlichem Sand, 14 Jahre alt:

$$f : f_1 = 1 : 4;$$

mit 1 und 2 cm Seitenlänge, zerdrückt bei 17,63 bezw. 70,82 kg:

$$P : P_1 = 1 : 4{,}02.$$

Zwei Würfel aus eben solchem Mörtel in anderem Mischungsverhältnisse trugen 17,95 bezw. 72,10 kg:

$$P : P_1 = 1 : 4{,}07.$$

Zwei andere Würfel obiger Abmessungen aus Mörtel trugen 21,31 bezw. 84,64 kg:

$$P : P_1 = 1 : 3{,}97.$$

Zwei andere Würfel obiger Abmessungen aus Mörtel fetten Kalkes und thonigen Sandes trugen 15,50 bezw. 62,20 kg:

$$P : P_1 = 1 : 4{,}02.$$

Zwei Würfel aus Gyps, deren Seiten 2 und 3 cm lang waren, demnach $f : f_1 = 2{,}25$, wurden zerdrückt mit 295,5 bezw. 665,0 kg:

$$P : P_1 = 1 : 2{,}25.$$

*) Recherches expérimentales sur les phénomènes physiques qui précèdent et accompagnent la rupture ou l'affaissement d'une certaine classe de solides. Annales des ponts et chaussées 1883, 2. S., p. 210

b) Für Prismen mit quadratischem Querschnitte.

Zwei solche Prismen aus Gyps, deren Querschnittsseiten 1 und 2 cm, deren Höhen 2 bezw. 4 cm waren, wurden durch Belastungen von 41,95 bezw. 165,20 kg zerdrückt; es verhalten sich

$$P : P_1 = 1 : 3{,}94 \text{ und } f : f_1 = 1 : 4.$$

Bei zwei anderen solchen Prismen, ebenfalls aus Gyps, deren Querschnittsseiten auch 1 und 2 cm waren, deren Höhen 0,5 und 1 cm betrugen, waren die Bruchbelastungen 46,30 bezw. 172,46 kg; es verhalten sich demnach

$$f : f_1 = 1 : 4 \text{ und } P = P_1 : 1 : 3{,}72.$$

c) Für Kugeln.

Zwei Kugeln aus Gyps, deren Durchmesser 1,75 und 2,25 cm maassen, demnach

$$f : f_1 = 1 : 1{,}65,$$

wurden mit 34,97 bezw. 55,50 kg zerdrückt:

$$P : P_1 = 1 : 1{,}59.$$

Zwei Kugeln aus lufttrockenem Ziegelthon mit 1,78 und 2,28 cm Durchmesser, demnach

$$f : f_1 = 1 : 1{,}64,$$

wurden bei einer Belastung von 25,14 bezw. 41,25 kg zerdrückt:

$$P : P_1 = 1 : 1{,}64.$$

d) Für regelmässige quadratische Pyramidenstumpfe.

Zwei solche Körper aus Kreide, welche 1,00 bezw. 1,5 cm Seite der Grundfläche, 0,66 bezw. 1,00 cm Seite der Deckfläche und 1,60 und 2,40 cm Höhe hatten

$$f : f_1 = 1 : 2{,}25,$$

wurden mit 20,0 bezw. 46,8 kg zerdrückt:

$$P : P_1 = 1 : 2{,}34.$$

Zwei eben solche Körper aus Gyps, welche 2,0 bezw. 3,0 cm Seite der Grundfläche, 1,0 und 1,5 cm Seite der Deckfläche und 3,0 bezw. 4,5 cm Höhe hatten, demnach

$$f : f_1 = 1 : 2{,}25,$$

wurden mit 84,5 bezw. 183,0 kg zerdrückt:

$$P : P_1 = 1 : 2{,}17.$$

e) Für Cylinder, welche, zwischen zwei parallelen Platten liegend, als Walzen zerdrückt wurden.

Zwei Cylinder aus trockenem Thone (Luftziegel?) mit 1,0 bezw. 2,0 cm und 1,5 bezw. 3,0 cm Länge, wobei sich verhält

$$f : f_1 = 1 : 4,$$

wurden zerdrückt mit 14,97 bezw. 59,75 kg:

$$P : P_1 = 1 : 3{,}99.$$

Endlich finden sich für ähnliche Körper, welche auf ähnliche Weise aus Stücken zusammengesetzt und übereinstimmend beansprucht wurden, auf Seite 3 des sechsten Heftes der Bauschinger'schen Mittheilungen noch eine Reihe der Vicat'schen Proben, welche gleichfalls das Zutreffen des Gesetzes darthun.

Es ist merkwürdig, dass Vicat bei Druckversuchen mit weichem Thone (p. 219 der Annales des ponts et chaussées 1883) zu der unrichtigen Beziehung

$$P \,.\, h = Const.$$

gelangte. Ohne die Vicat'schen Untersuchungen damals zu kennen, versuchte ich vor Jahren auch die Gültigkeit dieser Relation, welche bei geringen Formänderungen ziemlich zutrifft, überzeugte mich aber bald, dass sie nicht richtig ist.

Vicat hatte für den speciellen Fall des Zerdrückens spröder Körper das Gesetz der proportionalen Widerstände bereits 1883 gefunden und richtig formulirt, verirrte sich aber bei den Druckversuchen mit plastischen Materialien bereits zu einer falschen Relation, und in seinen Entwicklungen über Zug und Torsion findet sich dasselbe nicht mehr vor.

## 5. Zugfestigkeit von Stahl.

M. J. Barba hat in einer längeren Abhandlung über Festigkeitsuntersuchungen auf Zug*) ein Aehnlichkeitsgesetz aufgestellt und durch Versuche belegt, welches nichts anderes als ein specieller Fall des Gesetzes der proportionalen Widerstände ist, gleichbedeutend mit jener Folgerung aus dem Gesetze, welche S. 12 gezogen wurde. Barba erwähnt auch, dass die Herren Lebasteur und G. Marié, Ingenieure der P.-L.-M.-Bahn, dieses Aehnlichkeitsgesetz bereits 1878 abgeleitet und geprüft hätten. Barba's Versuche sind in der Weise ausgeführt, dass Stahl zuerst durch Schmieden zu einem achteckigen Prisma von 80/80 ausgereckt, hierauf durch Walzen in einen Rundstab von 30 mm Durchmesser gebracht, dann sorgfältig ausgeglüht wurde, um die Spannungen, welche vom Walzen herrühren können, zu beseitigen; das so vorbereitete Material wurde dann auf die Drehbank gebracht und die Probestäbe hergestellt.

Die nachfolgende Tabelle gibt die Barba'schen Versuche und aus den Daten derselben ist die vorzügliche Uebereinstimmung des Experimentes mit dem Gesetze zu ersehen.

*) Mémoires de la société des Ingenieurs Civils 1880, Vol. I, p. 682 — 714; bezüglich des Aehnlichkeitsgesetzes (loi de similitude) siehe insbesondere p. 690 — 693

**Barba's Zerreissversuche mit geometrisch ähnlichen Stäben.**

| Abmessungen der Probestücke | | | Widerstand | | | Dehnung | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|
| $D$ Durchmesser der Probestücke in mm | $L$ Länge der Probestücke zwischen den Marken in mm | Verhältniss $\frac{L}{D}$ | an der Elasticitätsgrenze in kg | an der Bruchgrenze in kg | Contraction (Striction) | Gesammtdehnung zwischen den Marken | Dehnung in Procenten der Länge |
| **I. Besonders weicher Stahl.** | | | | | | | |
| 20 | 200 | 10 | 24,8 | 37,6 | | 62,0 | 31,0 |
| 10 | 100 | | 24,7 | 36,8 | | 30,5 | 30,5 |
| 5 | 50 | | 24,8 | 37,7 | | 15,7 | 13,4 |
| **II. Weicher Stahl.** | | | | | | | |
| 6,90 | 50 | 7,24 | 24,0 | 42,0 | 0,307 | 16,4 | 32,8 |
| 10,35 | 75 | | 24,0 | 42,0 | 0,310 | 24,9 | 33,2 |
| 13,80 | 100 | | 24,2 | 42,1 | 0,303 | 33,0 | 33,0 |
| 17,25 | 125 | | 23,9 | 41,7 | 0,314 | 41,8 | 33,5 |
| 20,70 | 150 | | 23,8 | 41,6 | 0,308 | 50,4 | 33,6 |
| 24,15 | 175 | | 24,0 | 40,9 | 0,303 | 58,0 | 33,2 |
| 27,60 | 200 | | 24,1 | 40,0 | 0,312 | 66,0 | 33,0 |
| 31,05 | 225 | | 24,0 | 39,6 | 0,305 | 76,5 | 34,0 |
| | | | Mittel 24,0 | Mittel 41,3 | Mittel 0,308 | | Mittel 33,3 |
| **III. Harter Stahl.** | | | | | | | |
| 6,90 | 50 | 7,24 | 32,7 | 64,8 | 0,635 | 10,0 | 20,0 |
| 10,35 | 75 | | 36,6 | 64,9 | 0,620 | 14,1 | 18,8 |
| 13,80 | 100 | | 35,7 | 63,8 | 0,626 | 18,2 | 18,2 |
| 17,25 | 125 | | 38,0 | 63,3 | 0,616 | 22,7 | 18,1 |
| 20,70 | 150 | | 40,6 | 63,5 | 0,682 | 27,0 | 18,0 |
| 24,15 | 175 | | 38,1 | 62,0 | 0,642 | 31,7 | 18,1 |
| 27,60 | 200 | | 38,1 | 63,2 | 0,656 | 39,0 | 19,5 |
| 31,05 | 225 | | — | — | — | — | — |
| | | | Mittel 37,1 | Mittel 63,6 | Mittel 0,639 | | Mittel 18,6 |

### 6. Schlagversuche mit geometrisch ähnlichen Kupfercylindern.

Es wurden zwei Kupfercylinder $C_1$ und $C_1'$ von den nachstehend angegebenen Dimensionen unter einem Dampfhammer von 1300 kg activem Gewichte (durch Wägung bestimmt, Hammerklotzgewicht abzüglich der Reibung) bei je einem Schlage von gemessener Fallhöhe deformirt.*) Anderseits stand mir ein kleines Schlagwerk im technologischen Cabinet zu Gebote, dessen Schlagklotz ein actives Gewicht von 6,7 kg besitzt. Bei gleicher Fallhöhe verhalten sich die Schlagarbeiten

$$A_1 : A_2 = 1300 : 6{,}7,$$

oder nach Gleichung (1)

$$1300 : 6{,}7 = 1 : a^3;$$

hieraus folgt

$$a = \sqrt[3]{\frac{1300}{6{,}7}} = \sqrt[3]{194} = 5{,}79,$$

*) Derselbe Dampfhammer zeigte bei einer früheren Wägung 1339 kg actives Gewicht, welche Differenz sich aus geänderten Reibungsverhältnissen (Stopfbüchse etc.) erklärt.

daher die linearen Abmessungen des kleinen Vergleichcylinders $C_2$ sich zu $\frac{1}{5{,}79}$ von den correspondirenden Abmessungen des grossen Cylinders $C_1$ ergeben.

Man rechnete sich also die Dimensionen des kleinen Cylinders und liess hiernach solche anfertigen; es sind dies die Cylinderchen $C_2$ und $C_2'$ der nachfolgenden Tabelle I.

Diese Cylinderchen wurden im Schlagwerk bei Einhaltung der Bedingung

$$A_1 : A_2 = G_1 : G_2$$

deformirt und das Deformations-Ergebniss mit dem Deformations-Ergebnisse bei den grossen Cylindern verglichen.

Tabelle I.

**Schlagproben mit Kupfercylindern.**

$A_1 : A_2 = G_1 : G_2 = 194 : 1.$

| | $C_1$ | $C_1'$ | $C_2$ | $C_2'$ | Gerechnete Dimensionen |
|---|---|---|---|---|---|
| Höhe . . . . . | 38,05 mm | 38,10 mm | 6,6 mm | 6,6 mm | 6,57 mm |
| Durchmesser . . . | 28,25 mm | 28,25 mm | 4,95 mm | 4,95 mm | 4,88 mm |
| Gewicht . . . . . | 213,545 g | 213,985 g | 1,12 g | 1,13 g | 1,10 g |
| Fallhöhe . . . . . | 775 mm | 775 mm | 793 mm*) | 793*) | 775 mm |
| Actives Fallgewicht . | 1300 kg | 1300 kg | 6,7 | 6,7 kg | 6,7 kg |
| Abmessungen der deformirten Stücke. | | | | | |
| Höhe . . . . . | 15,0 mm | 15,0 mm | 2,6 mm | 2,6 mm | 2,60 mm |
| Durchmesser (grösster) | 46,6 mm | 46,7 mm | 7,9 mm | 8,0 mm | 8,04 mm |

Wie die vorstehenden Daten (Tabelle I) zeigen, ist das Resultat ein vollkommen befriedigendes; die deformirten Stücke blieben genau geometrisch ähnlich, denn $28{,}25 : 4{,}95 = 46{,}6 : 8{,}0$ oder $226 \doteq 230$.

Fig. 26 stellt die Anfangs- und Endformen der Versuchsstücke dar, für welche die Tabelle I die zugehörigen Daten lieferte.

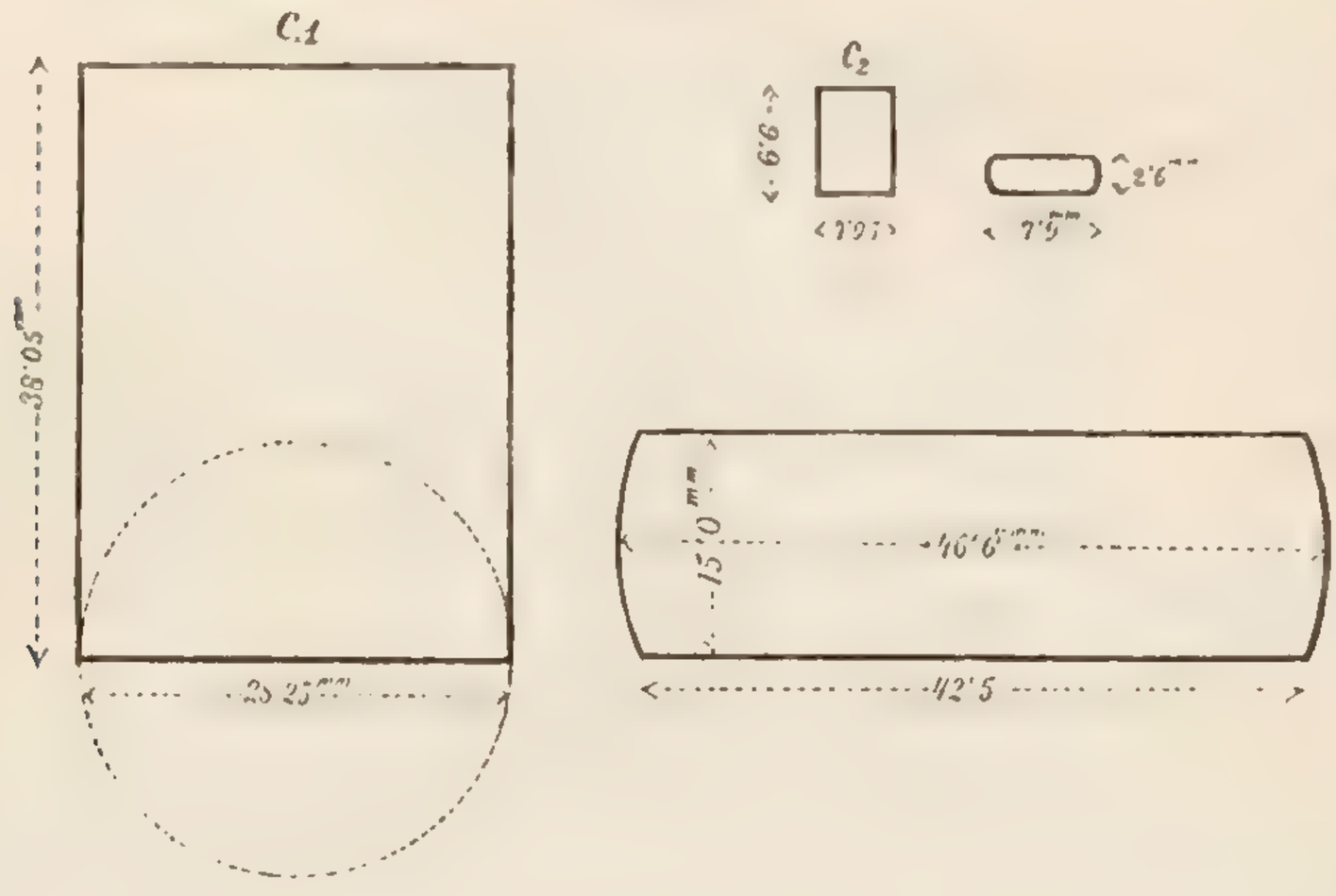
Betrachten wir nun die in der Tabelle II zusammengestellten Versuchsergebnisse, so wird sich nebst Anderem wieder die Richtigkeit des Gesetzes der proportionalen Widerstände ergeben. Zunächst sei bemerkt, dass die beiden Cylinder $C_1$ und $C_2$ (Tabelle II) als congruent betrachtet werden können, weil ihre Abmessungen eine völlige Uebereinstimmung zeigten und die Gewichte nur um 22 mg (0,1 Proc.) differirten. Ihre innere Gleichartigkeit wurde erwiesen, indem sich beide ganz übereinstimmend bei gleicher Inanspruchnahme (Schlag von 1 m Höhe durch 6,7 kg Gewicht des Fallklotzes) deformirten.

---

*) Die Fallhöhe ist mit Bezug auf das etwas grössere Gewicht der kleinen Probecylinder nach der Proportion $A_2 : A_2' = G_2 : G_2'$ oder $775 : x = 1{,}10 : 1{,}125$ richtig gestellt. Dass dies vollkommen zulässig ist, erhellt aus der Tabelle II. Indem die Deformationsform einer Tonne gleicht (s. Fig. 26), ist der grösste Durchmesser jener des Mittelquerschnittes, d. h. des Schnittes, welcher in gleichem Abstande von den Endflächen geführt ist.

Mit diesen beiden Versuchsstücken wurden nun vergleichende Versuche in der Weise vorgenommen, dass das eine vier Schläge aus 700 mm Höhe mit 6,7 kg (gleich 4,69 mkg per Schlag) erhielt, während dem zweiten Versuchsstücke vier Schläge aus 1372 mm Höhe mit 3,4 kg (gleich 4,66 mkg per Schlag) gegeben wurden. Diese beiden Schlagarbeiten sind als gleich zu bezeichnen, indem die geringe Differenz innerhalb der Fehler liegt, welche der Bestimmung des activen Gewichtes der Fallgewichte anhaften, d. h. innerhalb der Fehler, welche aus den Reibungsverhältnissen, dem Luftwiderstande u. dergl. hervorgehen, und welche auch von der Geschwindigkeit beeinflusst sind, aber nicht in Rechnung gezogen wurden.

Fig. 26.




Die gleichen Arbeitsgrössen haben die gleichen Formänderungen hervorgerufen, und nachdem dieselbe Thatsache auch bei ähnlichen Versuchen mit Blei beobachtet wurde, so lässt sich der Schluss ziehen, dass bei Schlägen geringe Geschwindigkeitsänderungen ohne Einfluss sind, wenn nur die Schlagarbeit $A = G \,.\, H$ denselben Werth hat. Es bleibt allerdings erst festzustellen, innerhalb welcher Grenzen die deformirende Wirkung von Schlägen nur an die Grösse des Productes $G \,.\, H$ gebunden ist; aber für unsere Dampfhämmer, deren Hub nicht innerhalb sehr weiter Grenzen wechselt, kann sicher hievon Gebrauch gemacht werden.

Mit den beiden Versuchsstücken wurde die Probe in der Weise fortgesetzt, dass auf $C_1$ weitere 20 Schläge (6,7 kg $\times$ 700 mm) geführt wurden, während $C_2$ 8 Schläge (6,7 kg $\times$ 1400 mm) von doppelter Wucht erhielt. Man ersieht aus der Tabelle, dass der 5., 10., 15., 20. Schlag auf $C_1$ sehr nahe das gleiche Ergebniss wie der 2., 4., 6., 8. Schlag auf $C_2$ hervorbrachte.

Für die gleiche Deformation der congruenten Probestücke wurde bei Anwendung doppelt so starker Schläge eine geringere Totalarbeit verbraucht.

# Tabelle II.

**Schlagversuche mit Kupfercylindern**

zugleich zur Ermittlung des Einflusses der Fallhöhe bei gleicher Schlagarbeit und des Einflusses wiederholter Schläge bei gleicher Gesammtarbeit.

$C_1$ $h = 15{,}0$ mm, $d = 15{,}2$ mm, $g = 24{,}212$ g

$C_2$ $h = 15{,}0$ mm, $d = 15{,}2$ mm, $g = 24{,}190$ g

$C_3$ $h = 18{,}2$ mm, $d = 17{,}95$ mm, $g = 40{,}615$ g

Auf $C_1$ und $C_2$ je ein Schlag aus 1 m Höhe mit 6,7 kg activem Gewichte.

$C_1$ $h' = 13{,}4$ mm, $d' = 16{,}2$ mm

$C_2$ $h' = 13{,}4$ mm, $d' = 16{,}2$ mm

Hiernach sind $C_1$ und $C_2$ vollkommen übereinstimmend.

Für die weiteren Schläge:

Fallhöhe = 700 mm, Actives Gewicht = 6,7 kg $= A_1 = A_2$ $H = 1372$ mm, $G = 3{,}4$ kg

Ein Schlag $H = 1{,}671$ m, $G = 6{,}7$ kg

$A_3 = H.G$ aus $A_1 : A_3 = 24{,}212 : 40{,}615$

$h' = 16{,}5$ mm

$d' = 18{,}95$ mm

$C_3$ verhält sich mithin dem Gesetz entsprechend.

$H = 1170$ mm

$G = 6{,}7$ kg.

| Schlag | Höhe | Durchmesser | Höhe | Durchmesser | Höhe | Durchmesser |
|---|---|---|---|---|---|---|
| 1 | 12,9 | 16,6 | 12,9 | 16,6 | 15,8 | 19,4 |
| 2 | 12,4 | 16,9 | 12,5 | 16,9 | 15,3 | 19,74 |
| 3 | 12,1 | 17,2 | 12,15 | 17,2 | 14,8 | 20,10 |
| 4 | 11,74 | 17,5 | 11,76 | 17,5 | 14,4 | 20,42 |
| Ebenso fortgefahren | | | Schlag | Fallhöhe 1,4 m Gewicht 6,7 kg | | |
| 5 | 11,5 | 17,8 | | | 14,0 | 20,70 |
| 6 | 11,16 | 18,0 | 1 | 11,0 | 18,1 | 13,64 | 21,05 |
| 7 | 10,90 | 18,2 | | | | 13,3 | 21,35 |
| 8 | 10,67 | 18,4 | | | | 13,0 | 21,55 |
| 9 | 10,4 | 18,6 | 2 | 10,5 | 18,6 | 12,75 | 21,8 |
| 10 | 10,2 | 18,8 | | | | 12,45 | 22,1 |
| 11 | 10,0 | 19,05 | 3 | 9,9 | 19,15 | 12,20 | 22,34 |
| 12 | 9,8 | 19,30 | | | | 12,0 | 22,6 |
| 13 | 9,6 | 19,50 | | | | 11,7 | 22,7 |
| 14 | 9,4 | 19,6 | 4 | 9,5 | 19,6 | 11,55 | 22,95 |
| 15 | 9,25 | 19,8 | | | | | |
| 16 | 9,10 | 20,0 | 5 | 9,1 | 20,1 | | |
| 17 | 9,00 | 20,2 | | | | | |
| 18 | 8,85 | 20,4 | | | | | |
| 19 | 8,7 | 20,5 | 6 | 8,7 | 20,47 | | |
| 20 | 8,56 | 20,65 | | | | | |
| 21 | 8,4 | 20,9 | 7 | 8,35 | 20,9 | | |
| 22 | 8,3 | 21,0 | | | | | |
| 23 | 8,17 | 21,15 | | | | | |
| 24 | 8,05 | 21,3 | 8 | 8,00 | 21,35 | 9,9 | 24,9 |

nicht gemessen

nicht gemessen

Die Totalarbeit der 8 kräftigen Schläge beträgt nämlich

$$A = 8 \,.\, 1{,}400 \,.\, 6{,}7,$$

jene der 20 schwächeren Schläge

$$A' = 20 \,.\, 0{,}700 \,.\, 6{,}7,$$

oder es verhalten sich diese Arbeitsgrössen wie

$$A : A' = 16 : 20 = 4 : 5.$$

Es ist dies auch sehr begreiflich, denn von jedem Schlage wird ein bestimmter Theil zur Ueberwindung des elastischen Widerstandes verbraucht, und erst der Rest der Schlagarbeit bewirkt ein Fliessen, resp. eine bleibende Formveränderung des Probestückes. Dieser Theil des Versuches ist in vollster Uebereinstimmung mit Schlagproben, durch welche seiner Zeit General Uchatius Bronze auf Zerreissfestigkeit in Anspruch nahm. Wir kommen hierauf später zurück.

In Tabelle II sehen wir ferner einen nahezu geometrisch ähnlichen Kupfercylinder $C_3$ in solcher Weise deformirt, dass die auf ihn aufgewandten Arbeitsgrössen zu jenen, durch welche $C_1$ seine Formänderungen erlitt, sich wie die Gewichte der beiden Cylinder verhalten. Suchen wir die Endresultate, welche der Versuch mit $h = 9{,}9$ mm und $d = 24{,}9$ mm gibt, durch Rechnung aus den Daten über den mit $C_1$ angestellten Versuch zu finden, so wird

$$h = 8{,}05 \times \frac{18{,}2}{15} = 9{,}7 \text{ mm}$$

und

$$d = \frac{21{,}3 \times 17{,}95}{15{,}2} = 25{,}15$$

erhalten; der Fehler beträgt mithin 2 Proc. bei $h$ und etwas über 1 Proc. bei $d$, was bei Anwendung einer so grossen Zahl von Schlägen und bedeutenden Deformationen gewiss nicht von Belang ist, um so weniger, als die Fehler in der geometrischen Aehnlichkeit der Versuchsstücke ca. 1 Proc. betragen.

## 7. Schlagversuche. Zerschlagen von Stein-, Masse- und Gusseisenkugeln.

Das Allgemeine über diese Versuche wurde bereits S. 5 und 8 gegeben. Hier seien zunächst in nebenstehender Tabelle einige Versuche mit Gusseisenkugeln ziffermässig wiedergegeben.

Indem die Zahlen der 7. Colonne, die Bruchfactoren, trotz der sehr verschiedenen Gewichte 7,8 bis 5500 g der Kugeln nahezu gleich erhalten wurden, so ist auch durch diese Versuche das Gesetz der proportionalen Widerstände vollkommen bestätigt.

Es zeigt dies ganz besonders der Vergleich der Versuchsdaten Nr. 1, 2, 6 und 7. Wäre die alte Annahme richtig ($A : A' = 1 : a^2$), so hätte die Kugel Nr. 7 bei einem Schlage von 140,4 mkg oder, bei dem in der Tabelle angegebenen Gewicht der Birne des Schlagwerkes von 473 kg,

bei einer Hubhöhe von 0,3 m zum Bruch gebracht werden müssen.*) Referent kann mit Sicherheit behaupten, dass eine massive Gusseisenkugel von 5,5 kg bei einem so schwachen Schlage nie zum Bruch gebracht werden kann, mag auch das Gusseisen zu dem ordinären, grobkörnigen gehören.

**Schlagversuche mit Gusseisenkugeln.**)**

| Nr. | Durchmesser der Kugeln in mm | Gewicht der Kugeln in g | Actives Gewicht $G$ d. Hammers in kg | Hub $h$ in m | Bruch-arbeit in mkg gleich $G \times h$ | Arbeit in mkg, bezogen auf 1 kg Kugel-gewicht (Bruch-factor) | Anmerkung. |
|---|---|---|---|---|---|---|---|
| 1 | 18,0 bis 18,2 | 22,0 | 6,75 | 0,7 | 4,725 | 215 | |
| 2 | 24,0 bis 24,1 | 51,8 | 6,75 | 1,5 | 10,125 | 195 | Die Kugeln Nr. 2—4 zeigten im Bruch etwas gröberes Korn als die Kugeln 1, 5, 6 u. 7. |
| 3 | 24,1 bis 24,3 | 52,1 | 6,75 | 1,3 | 8,775 | 170 | |
| 4 | 23,9 bis 24,1 | 51,9 | 6,75 | 1,05 | 7,088 | 136 | kein Bruch, nur schwache Sprünge. |
| 5 | 14,5 bis 14,6 | 11,35 | 6,75 | 0,32 | 2,160 | 190 | kein Bruch, nur schwache Sprünge. |
| 6 | 12,7 bis 12,9 | 7,8 | 0,555 | 3,2 | 1,776 | 228 | |
| 7 | 113 bis 115 | 5500 | 473 | 2,32 | 1097,3 | 200 | Die Bruchfläche nahezu so feinkörnig, wie bei 1, 5 u. 6. |

*) Es soll der Versuch Nr. 6 nach Rittinger's Regel zur Bestimmung der erforderlichen Arbeitsgrösse für die Theilung der grossen Kugel als Grundlage dienen, weil dieser Versuch einen besonders grossen Bruchfactor ergab, sich daher das Rechnungsresultat für die alte Annahme günstig stellen müsste (vergl. S. 14). Man erhielte

$$12{,}8^2 : 114^2 = 1{,}776 : A',$$

daraus würde

$$A' = \frac{12996 \times 1{,}776}{163{,}84} = 140{,}4 \text{ mkg}$$

folgen, mithin wäre die Hubhöhe

$$h = \frac{140{,}4}{473} = 0{,}296 \text{ m},$$

während wir einer Arbeitsgrösse von 1097,3 mkg und einer Hubhöhe von 2,32 m bedurften.

**) Bei Herstellung der Kugeln ist feinkörniges graues Eisen, trockene Formen und gleiche Höhe der Eingüsse zu wählen, um die Masse in möglichster Gleichförmigkeit und ohne Gusshaut zu erlangen.

Zum Zwecke der Orientirung, ob und welchen Einfluss die Geschwindigkeit des Schlages ausübt, wurden sowohl mit Stein- als Gusseisenkugeln Versuche in dem Sinne angestellt, innerhalb welcher Grenzen die Factoren $G \,.\, h = A$ eine Aenderung gestatten, ohne das Resultat zu beeinflussen. Es wurde gefunden, dass $h$ innerhalb 0,3 m bis 3 m geändert werden konnte, ohne dass das Ergebniss des Schlages, $G \,.\, H =$ Constante genommen, ein anderes wird.

Die käuflichen Spiel-Steinkugeln standen uns nicht in so verschiedener Grösse zur Verfügung als die Gusseisenkugeln; die diesbezüglichen Versuche, welche gleichfalls das Gesetz bestätigten, haben daher nicht jene überzeugende Bedeutung, welche den Versuchen mit den Gusseisenkugeln zukommt. Dasselbe gilt von Glas-, Cement- und Sandthonmassekugeln. Wir verwendeten diese Materialien daher vorwaltend zu dem Zwecke, die Beziehungen jener Arbeitsgrössen kennen zu lernen, welche zum Zerschlagen und zum Zerschleudern erforderlich sind.

Nennen wir jene Fallhöhe, von welcher an der Bruch erfolgt, Bruchhöhe, so ist in der in Metern gemessenen Bruchhöhe dann unmittelbar jene Arbeitsgrösse in mkg gegeben, welche dem Bruche der Gewichtseinheit (1 kg) des Materiales entspricht. Die Frage nach dem Verhältnisse der Arbeitsgrössen für das Zerschlagen und das Zerschleudern spitzt sich daher zur Frage nach dem Verhältnisse von Bruchfactor und Bruchhöhe zu. Die Versuche ergaben

| | Bruchfactor | Bruchhöhe |
|---|---|---|
| Kugeln aus getrocknetem Thon . . . . . | 0,97 bis 1,3 | 1 bis 1,2 |
| „ „ 1 Theil Thon, 2 Th. Sand*), schwach gebrannt | 1,2 „ 1,4 | 1,1 „ 1,5 |
| „ „ derselben Masse, lufttrocken . . . . . | ca. 1,1 | ca. 1 |
| „ „ Sand und ordinärem Siegellack . . . . . | ca. 3 | ca. 3 |
| „ „ reinem Cement (Kugeln unregelmässig) . . | ca. 5 | ca. 6 |
| „ „ 1 Th. Sand, 1 Th. Thon, schwach gebrannt | 2,0 bis 2,34 | 2,0 bis 2,2 |
| „ „ Chamotte I. Sorte (Klinkermasse) . . . . | 15 „ 17 | 16 „ 18 |
| „ „ „ II. „ „ . . . . | 25 „ 32 | bis 24 wenig Bruch**) |

Aus diesen Versuchen geht daher hervor, dass der Bruchfactor sehr nahe gleich der Bruchhöhe, daher auch die zum Zerschlagen erforderliche Arbeitsgrösse sehr nahe gleich jener zum Zerschleudern ist. Dieses Versuchsergebniss sagt auch, Kugeln gleichen Materiales kommen bei einer bestimmten Fallhöhe zum Bruche, und dieses Ergebniss ist nichts anderes als ein specieller Fall des Gesetzes der proportionalen Widerstände; natürlich nur insofern gültig, als der Luftwiderstand keinen wesentlichen Einfluss übt, was bei sehr kleinen Kugeln auch aus schwerem Materiale bei grosser Bruchhöhe immer der Fall sein müsste. Dass man zu so einfachen Beziehungen

*) Durch Drahtsieb Nr. 40 gesiebt. Thon und Sand trocken gewogen.

**) Eine grössere Fallhöhe stand nicht zur Verfügung.

nicht schon längst durch die Praxis gekommen ist, kann seinen Grund nur in den grossen Verschiedenheiten auch scheinbar gleichen Materiales haben.

Die lebendige Kraft $\frac{Gv^2}{2g} = GH$, durch welche der fallende Körper beim Auffallen auf eine feste Unterlage zum Bruche gelangt, ist von der durch den Fall bedingten Geschwindigkeit $v = \sqrt{2gH}$ abhängig. Es ist gleichgültig für die Wirkung, ob dem zu zerschleudernden Körper durch andere Mittel jene Geschwindigkeit ertheilt wird. Wir haben daher in der Bruchhöhe oder dem ihr gleichen Bruchfactor auch direct das Mittel zur Bestimmung der bei Desintegratoren anzuwendenden Geschwindigkeit $v \geqq \sqrt{2gH}$, wobei $H$ die Bruchhöhe bedeutet.

Anmerkung. Soll durch das Experiment für Kugeln bestimmten Materiales die Bruchhöhe (gleich dem Bruchfactor) gefunden werden, so muss sowohl fürs Zerschlagen als Zerschleudern ein genügend widerstandsfähiger Ambos verwendet werden. Damit die Kugeln bei freiem Falle richtig den Ambos treffen, bediene man sich folgenden Verfahrens. In eine mit einem Grübchen versehene Latte wird eine Kugel eingelegt, die Latte dann in eine bestimmte Position, z. B. an einem Fenster von ermittelter Höhenlage, gebracht und diese Position mit Marken festgestellt. Der Hilfsarbeiter hat den Ambos nun an jene Stelle zu setzen, wohin die Kugel nach erfolgtem Abrollen von der langsam gedrehten Latte fällt. Bei ruhiger Luft wird nach wenigen Proben, wozu man sich beliebiger Kugeln bedienen kann, die rechte Lage des Amboses gefunden sein, und die Kugeln werden bei dem weiteren Experimente stets richtig auffallen.

### 8. Zerschlagen geometrisch ähnlicher Glascylinder.

Die Cylinderchen, hergestellt aus gezogenen Glasstäben, waren annähernd geometrisch ähnlich.

$$C_1 \begin{cases} h_1 = 31{,}0 \text{ mm} \\ d^1 = 19{,}2 \text{ mm} \\ G = 22{,}0 \text{ g} \end{cases} \qquad C_2 \begin{cases} h_2 = 10{,}4 \\ d_2 = 6{,}5 \\ G = 0{,}75 \text{ g} \end{cases}$$

Die zum Zerschlagen erforderlichen Arbeitsgrössen waren

$$A_1 = 0{,}56 \text{ mkg}$$

und

$$A_2 = \frac{0{,}75}{22} \cdot 0{,}56 = 0{,}019 \text{ mkg},$$

es entsprachen dieselben hiermit dem Gesetze. Der Bruch erfolgte in stängelige Stücke. Der Bruchfactor berechnet sich zu 25,23.

---

Hier mag hervorgehoben werden, dass die Bruchfactoren nicht nur vom Materiale, sondern ganz wesentlich von der Form abhängen, denn diese bedingt mit die Art des Bruches, falls man ebene Schlagflächen anwendet. Es ist natürlich, dass man auch andere, schärfere Zertheilungsmittel anwenden kann, und indem dieselben in anderer Art zertheilend einwirken, als die ebenen Schlagflächen es thun, so würde man auch für sie andere Bruchfactoren finden.

Die nachstehende Tabelle zeigt also nur, dass bei Anwendung ebener Schlagflächen der Bruchfactor sehr wesentlich von der Form abhängig ist. Die Form bedingt in diesen Fällen die Art der Zertheilung, indem sich über der unmittelbar geschlagenen Stelle kegelförmige Massen aufbauen, welche theilend wirken und von deren Form und Grösse die Theilungsarbeit wesentlich abhängt. (Vergl. S. 6.)

| Material | Form | Bruchfactor in Meter-Kilogrammen |
|---|---|---|
| Gusseisen, dichtes, graues . . . | Kugel | 200 (130 bis 230) |
| Gusseisen, dichtes, graues . . . | Würfel | 2000 |
| Thonkalkmasse (Spielkugeln) . . | Kugel | 13 bis 14 |
| Glas (Milchglas) . . . . . | Kugel | 35 „ 37 |
| Glas, farbloses . . . . . | Cylinder $h : d = 31 : 19{,}2$ | 25 „ 27 |
| Marmor . . . . . | Kugel | 40 |
| Marmor . . . . . | Würfel | 58 |

## 9. Abscheeren und Lochen von Metallen.

Man nennt gewöhnlich das Schneiden mit der Scheere, wie es bei Blechen zur Wirkung kommt, Abscheeren, und insofern dieser Sprachgebrauch zulässig ist, darf derselbe auch in dieser Ueberschrift angewendet werden.

a) Es wurden aus demselben Eisenbleche durch Feilen und Schleifen Blättchen verschiedener Dicke hergestellt.

Der Schnittwiderstand für den Schneidewinkel $\varphi = 9^1/_2{}^0$ betrug für Blechdicke

$\delta = 0{,}575$ mm, bei 3 Versuchen 23, 21 und 24 kg, also im Mittel 22,6 kg,
bei $\delta = 1{,}42$ mm, „ 2 „ 135, 115 kg, „ „ „ 125 kg,
nach dem Gesetze der proportionalen Widerstände (vergl. S. 22) muss

$$P : P_1 = \delta^2 : \delta_1{}^2$$

sein, oder

$$22{,}6 : x = 0{,}575^2 : 1{,}42^2,\ x = \frac{22{,}6 \times 2}{0{,}33} = 136.$$

Die Uebereinstimmung ist mithin eine gute, denn der Fehler beträgt nur ca. 8 Proc.

b) Der Schnittwiderstand des Eisenbleches bei dem Schneidewinkel $\varphi = 14^1/_2{}^0$ betrug für die Blechstärke

$\delta = 575$ mm, bei 3 Versuchen 18, 16, 20 kg, im Mittel 18 kg,
$\delta = 1{,}42$ „ „ 3 „ 87, 107, 119 „ „ „ 104 „

Durch Rechnung findet man

$$18 : x = 0{,}575^2 : 1{,}42^2,\ x = 109;$$

es beträgt also der Fehler kaum 5 Proc.

Die Uebereinstimmung ist insofern eine vollkommene, als die Unterschiede der erforderlichen Pressungen bei derselben Blechstärke grösser

sind als die Abweichung der Mittelwerthe der Pressungen für die verschiedenen Blechstärken von jenen Werthen, welche sich rechnungsgemäss nach dem Gesetze der proportionalen Widerstände ergeben.

c) Lochen von Blei- und Zinkplatten. Aus Treska's umfangreichen Versuchen, welche im 20. Bande der Savants étrangers enthalten sind, lassen sich leider nicht einmal zwei genau geometrisch ähnliche Stücke in Vergleich ziehen. Aus der S. 743 gegebenen Tabelle können nur zwei Proben als für unsere Betrachtung halbwegs geeignet herausgezogen werden.

Bleischeibe Nr. 2 { Durchmesser 60 mm, Dicke 24 mm | Stempeldurchmesser 20 mm, Maximalpressung 2665 kg

Bleiplatte Nr. 8 { lang 124 mm, breit 124 mm, dick 51 mm | Stempeldurchmesser 50 kg, Maximalpressung 13627 kg

Nach den Dimensionen der gelochten Platten betrüge das Verhältniss nahezu 1 : 2, daher nach unserem Gesetze

$$P : P_1 = 1 : 4$$

sein müsste, was die Pressung im zweiten Falle zu 10660 kg ergäbe.

Nach dem Verhältnisse der Stempeldurchmesser wäre

$$P : P_1 = 2^2 : 5^2 = 4 : 25,$$

oder die Pressung im zweiten Falle 16656 kg; es liegt also, so wie es sein muss, die von Treska gefundene Zahl zwischen diesen beiden.

Auf Seite 754 a. a. O. sind Lochungsproben von Zink in einer Tabelle angegeben; auch hier sind genau geometrisch ähnliche Probestücke nicht vorhanden, indem die Zinkplatten gleiche Länge und Breite und nur verschiedene Dicke haben. Halbwegs zur Vergleichung sind geeignet:

Zinkplatte Nr. 1 { Durchmesser des Lochstempels 30 mm, Blockdicke 35 mm, Blocklänge 117 mm, Blockbreite 120 mm | Widerstand bei 3 mm Einpressung des Stempels 25178 kg.

Zinkplatte Nr. 2 { Durchmesser des Lochstempels 40 mm, Blockdicke 45 mm, Blocklänge 120 mm, Blockbreite 120 mm | Widerstand bei 4 mm Einpressung des Stempels 38645 kg.

Man sieht, dass die linearen Abmessungen nahe wie 3 : 4 sich verhalten. Genau wäre dies der Fall, wenn die Blockdicke in Nr. 2 statt 45 mm 46,6 mm und die Länge und Breite 160 mm betragen würde. Es muss also die Zahl 38645 kg kleiner sein, als die aus dem ersten Versuche nach dem Gesetze der proportionalen Widerstände berechnete Zahl

$$25178 \times (4/3)^2 = 44761 \text{ kg},$$

und dies ist auch der Fall.

d) Zinnblech, Staniol, wurde gelocht, beziehungsweise wurden Kreisscheiben ausgedrückt. Der Widerstand gegen das Durchschneiden betrug bei

| Blechstärke | Stempel-Durchmesser | Stempel-Umfang | Totale Pressung im Mittel | Schnittwiderstand pr. 1 qmm |
|---|---|---|---|---|
| mm | mm | mm | kg | kg |
| 0,21 | 5,78 | 18,12 | 7 | 1,84 |
| 0,37 | 5,78 | 18,12 | 13 | 1,94 |
| 0,67 | 5,78 | 18,12 | 24 | 1,97 |
| 0,21 | 14,72 | 46,22 | 17 | 1,75 |
| 0,37 | 14,72 | 46,22 | 32,2 | 1,87 |
| 0,67 | 14,72 | 46,22 | 60 | 1,93 |
| 0,37 | 20,25 | 63,6 | 40 | 1,70 |
| 0,67 | 20,25 | 63,6 | 82 | 1,92 |

Demnach betrug der mittlere Schnittwiderstand pr. 1 qmm Schnittfläche 1,89. Bei geradem Schnitt und 20 mm Schnittbreite wurde gefunden:

für Blech von 0,21 mm Dicke 8 kg Pressung entsprechend 1,90
„ „ „ 0,37 „ „ 13,5 „ „ „ 1,87 } Mittel 1,92.
„ „ „ 0,67 „ „ 27 „ „ „ 2,01

Ist für dünne Bleche der Schnittwiderstand proportional der Schnittfläche, wie es die vorstehenden Zahlen darthun, so ist auch das Gesetz der proportionalen Widerstände erfüllt oder der Gleichung II entsprochen.

Nachdem das Gesetz der proportionalen Widerstände mithin auch für die Arbeit mit der Scheere und den Durchschnitt Geltung hat, so konnten Coëfficienten für den Schneidwiderstand gefunden werden, welche nachstehende Tabelle bietet.

Tabelle I.

**Coëfficienten des Schneidwiderstandes bezogen auf Bleche von 1 mm Dicke.*)**

| Material | Schneidwiderstand in Kilogrammen $\varphi = 5^1/_2{}^0$ | $\varphi = 9^1/_2{}^0$ | $\varphi = 14^1/_2{}^0$ | $\varphi = 0^0, b = 10$mm | Anmerkung |
|---|---|---|---|---|---|
| Eisenblech | 100 | 70 | 53 | 200 | Die Zuschärfungswinkel der Scheerbacken betrugen $86^0$, nur jener für $\varphi = 14^1/_2{}^0$ hatte einen Zuschärfungswinkel von $88^0$. |
| Stahlblech | 165 | 118 | 100 | 400 | |
| Kupferblech | (56) 90 | (37) 56 | (28) 41 | 150 | |
| Messingblech | 100 | 60 | 43 | — | |
| Zinkblech | 44 | 29 | 24 | 120 (106) †) | †) Die Zahl 106 ist bei sehr langsamem Vorgange erhalten. |
| Staniol (Zinnblech) | 14 | 9 | 6 | 19 | |

*) Statt der Winkel $\varphi = 5^1/_2$, $9^1/_2$, $14^1/_2{}^0$ waren die Winkel $5^0$, $10^0$, $15^0$ bei der Bestellung des Apparates verlangt worden; die Ausführung wich von der Bestellung in der erwähnten Weise ab. — Die Versuche wurden fast durchgehends mit dünnen Blechen durchgeführt, welche bekanntlich widerstandsfähiger als dicke sind, so dass unsere Zahlenwerthe hoch sind. Nur das zum Experimente verwendete Zinkblech hatte eine Dicke von 1,74 mm. Diese und die folgende Tabelle wurde zuerst in den technischen Blättern 1884, S. 121 ff. veröffentlicht.

Die Tabelle I gab in den Rubriken $\varphi = 5^1/_2{}^0$, $9^1/_2{}^0$ und $14^1/_2{}^0$ die auf den oberen beweglichen Scheerbacken auszuübenden Verticaldrücke für das Schneiden der Bleche von 1 mm Dicke. Man kann aus diesen Werthen leicht zur Bestimmung der erforderlichen Arbeitsgrössen übergehen, weil bei gleicher Breite des zu schneidenden Bleches die vom Scheerbacken zurückzulegenden Wege proportional der Tangente des Schneidewinkels sind. Man findet daher die Arbeitsgrössen als die Producte aus den Pressungen mal der Blechbreite $b$ mal der Tangenten von $\varphi$. Nimmt man die Blechbreite $b$ zu einem Meter an, dann drückt die Tangente den Weg unmittelbar in Metern aus und das Product $P\,tg\,\varphi$ ist die Arbeit in Meterkilogrammen. Es sind mithin die Werthe der zweiten Colonne der Tabelle I mit $tg\,5^1/_2{}^0 = 0{,}0963$, der dritten mit $tg\,9^1/_2 = 0{,}167$ und der vierten Colonne mit $tg\,14^1/_2{}^0 = 0{,}259$ zu multipliciren und wir erhalten hiedurch:

Tabelle II.

**Die Arbeitsgrössen für das Schneiden 1 mm dicker und 1 m langer Bleche.**

| Material | Arbeit in Meterkilogrammen $\varphi = 5^1/_2$ | $\varphi = 9^1/_2$ | $\varphi = 14^1/_2$ |
|---|---|---|---|
| Eisenblech | 9,63 | 11,69 | 13,73 |
| Stahlblech | 15,89 | 19,71 | 25,9 |
| Kupferblech | 8,67 | 9,35 | 10,52 |
| Messingblech | 9,63 | 10,02 | 11,14 |
| Zinkblech | 4,24 | 4,84 | 6,22 |
| Staniol (Zinnblech) | 1,35 | 1,50 | 1,55 |

Im Nachstehenden seien einige Beispiele der Anwendung dieser Tabellen gegeben:

### Beispiele der Anwendung der Coëfficienten des Scheerwiderstandes.

1. Eine Kupferplatte von 12 mm Dicke soll mit einer Scheere vom Schneidewinkel $\varphi = 6^0$ geschnitten werden. Welcher Maximaldruck ist erforderlich und welche Arbeit bei einer Blechbreite von 800 mm?

Da $\varphi = 6^0$ etwas günstiger arbeitet als $\varphi = 5^1/_2{}^0$, so werden die bei diesem Winkel in der Tabelle angegebenen Coëfficienten etwas zu gross sein; der Werth der gesuchten Pressung wird mit

$$P = 90 \,.\, 12^2 = \mathbf{12960}\ \text{kg}$$

daher etwas überschritten sein, was jedoch um so weniger bedeutet, als der grosse Einfluss des Eckens, von welchem später noch die Rede sein wird, hinzukommt. Mit Bezug auf den $\measuredangle 6^0$ beträgt der Weg des Scheerblattes

$$800\ \text{mm} \,.\, tg\,6^0 + 12\ \text{mm} = 800 \,.\, 0{,}105 + 12 \doteq 96\ \text{mm}$$

oder nahe $^1/_{10}$ Meter, daher die zu leistende Arbeit $A = {}^1/_{10} \,.\, 12960$ oder abgerundet 1300 mkg betragen wird.

2. Es soll aus einem Stahlbleche von 0,5 mm Dicke eine Kreisscheibe von 300 mm Durchmesser mittels eines Durchschnittes hergestellt werden. Wie gross ist der dazu erforderliche Druck?

Bei Anwendung des Durchschnittes beträgt der Schneidwinkel $\varphi$ stets 0°. Wir haben daher aus der Zahl 400, welche die Tabelle gibt, zunächst die Pressung für ein Blech von 0,5 mm Dicke zu rechnen, denn jene Zahl gilt für

$$\delta = 1\,\text{mm} \text{ und } b = 10\,\text{mm}.$$

Diese Pressung wird

$$\frac{400}{2} = 200 \text{ für } \delta = \frac{1}{2}\,\text{mm} \text{ und } b = 10\,\text{mm} = 1\,\text{cm}$$

betragen.*) Mit dieser Pressung ist die in Centimetern ausgedrückte Schnittlänge zu multipliciren. Wir erhalten den Maximaldruck

$$P = 30 \,.\, 3{,}14 \,.\, 200 = 18\,840\,\text{kg, rund } 20\,000\,\text{kg}.$$

Die erforderliche Arbeitsgrösse findet man annäherungsweise dadurch, dass man diesen Maximaldruck durch etwa $^2/_3$ der Blechstärke wirkend denkt (s. unten), man erhält

$$A = 0{,}66 \,.\, \frac{0{,}5}{1000} \,.\, 20\,000 = 6{,}6\,\text{mkg}.$$

3. Man beabsichtige eine Kupferplatte von 30 mm Dicke mit einem Stempel von 20 mm Durchmesser zu lochen. Wie gross ist der hiezu nöthige Druck?

In Beantwortung dieser Frage kann man aus dem Vorstehenden nur zu einem Werthe gelangen, welcher wesentlich grösser ist als der richtige; denn in dem vorliegenden Falle ist der Abscheerungswiderstand grösser als jener gegen das Eindringen des Stempels in das Material. Es ist dies stets der Fall, wenn der Stempeldurchmesser kleiner als die Blechstärke ist, ein und einhalbfache. Rechnen wir daher den Abscheerungswiderstand

$$P = 150 \,.\, 30 \,.\, \frac{20 \,.\, 3{,}14}{10} = 28\,260\,\text{kg},$$

so haben wir einen Werth, welcher jedenfalls grösser ist als der erforderliche, für die Constructionsbedürfnisse aber immerhin hinreicht.

Der wirkliche Werth dürfte kaum 21 000 kg erreichen.**)

*) Man kann auch hier, wenn man gerade will, das Gesetz der proportionalen Widerstände anwenden. Aus $P$ für $\delta = 1$, $b = 10$ findet man $P_1$ für $\delta' = {}^1/_2$, $b' = 5$ nach der Gleichung $P : P_1 = 1 : a^2 = 1 : {}^1/_4$, daher $P_1 \frac{400}{4} = 100$, mithin für die doppelte Breite (10 mm) gleichfalls den Werth 200 wie oben. Ist $\varphi = 0$, so ist der Maximaldruck direct proportional der Scheerfläche, wenn die Wirkung der Scheere, wie dies bei dünnem Bleche der Fall ist, ein ziemlich reines Abscheeren ist; ist einerlei Blech zu schneiden, $\delta$ also constant, so ist der Widerstand proportional der Schnittlänge $b$.

**) Professor K. Keller veröffentlichte in der Zeitschrift des Oesterr. Ingenieurvereins 1879, S. 163 eine Abhandlung über das Lochen von Eisen, welche zu einfachen Formeln für den Arbeitsaufwand führte, welche innerhalb der gewöhnlichen Verhältnisse (Lochen von Kesselblech) ganz gut stimmen. Es ist dies auch darin begründet, dass die der Ableitung der Formeln zu Grunde liegenden Voraussetzungen auf gemachten Versuchen aufgebaut sind; so ist z. B. das Verhältniss $\frac{k_1}{k_2} = 2{,}6$ gesetzt.

Die vorstehende Tabelle II kann man in sehr bequemer Weise zur Berechnung der Arbeitsgrössen für das Schneiden dickerer Bleche benutzen. Nach dem Gesetze der proportionalen Widerstände ist

$$A : A' = 1 : a^3 = \delta^2 b : \delta_1{}^2 b_1 ;$$

setzen wir Bleche gleicher Breite, also $b = b_1$ voraus, was man hier darf, so erhalten wir

$$A : A' = \delta^2 : \delta_1{}^2,$$

und für

$$\delta = 1 \text{ mm}, \; A' = A\delta^2 ;$$

wir haben also nur die in der Tabelle stehende Zahl mit $\delta_1{}^2$ zu multipliciren. Soll z. B. die Arbeit für das Schneiden einer Eisenplatte von

---

wobei $k_1$ der specifischen Pressung an der Stempelfläche am Ende der Dislocationsperiode und $k_2$ die specifische Spannung an der Abscheerungsfläche bedeutet, welches Verhältniss nur unter gewöhnlichen Verhältnissen von $D$ und $\delta$ annäherungsweise einen constanten Werth haben kann, auch ist die Gleichung (1) der Keller'schen Entwicklung nur für diese Verhältnisse zulässig.

Die Keller'schen Formeln lauten:

$$A = D^3 \pi 0{,}04 \left[ \left(\frac{\delta}{D}\right)^2 - 0{,}21 \right] \text{ gültig für : } \frac{D}{\delta} < 1{,}54$$

$$A = D^3 \, \pi \, 0{,}02 \left(\frac{\delta}{D}\right)^2 \ldots \; „ \quad „ \; \frac{D}{\delta} > 1{,}54$$

oder auf 1 qmm Schnittfläche bezogen:

$$\mathfrak{A} = 0{,}04 \, \delta \left[ 1 - 0{,}21 \left(\frac{D}{\delta}\right)^2 \right] \ldots \text{ für } \frac{D}{\delta} < 1{,}54$$

$$\mathfrak{A} = 0{,}02 \, \delta \ldots \ldots \ldots \ldots \ldots „ \; \frac{D}{\delta} > 1{,}54$$

$D$ = Stempeldurchmesser in mm.
$\delta$ = Blechstärke in mm.
$A$ = Arbeit in Meterkilogr.

Hartig hat für das Lochen von Eisen (auf dieselben Einheiten bezogen) die empirische Formel

$$A = 0{,}25 + 0{,}0145 \, \delta$$

aufgestellt, und sowohl die Keller'schen als die Hartig'sche Formel geben für die gewöhnlichen Verhältnisse mittelmässig stimmende Resultate; genau stimmen sie untereinander nur überein für

$$0{,}04 \, \delta \left[ 1 - 0{,}21 \left(\frac{D}{\delta}\right)^2 \right] = 0{,}25 + 0{,}0145 \, \delta \text{ oder } \frac{D}{\delta} = \sqrt{3 - \frac{30}{\delta}}.$$

Rechnet man die für das Lochen eines Eisenbleches von der Dicke $10 \text{ mm} = \delta$ und dem Stempeldurchmesser $D = 20$ mm erforderliche Arbeitsgrösse nach Hartig's Formel, so erhält man 248 mkg, nach Keller 125,6 mkg, und bestimmt man sich aus der ersten Tabelle (S. 62) den Abscheerungswiderstand hierfür, so findet man

$$P = 200 \, . \, 2 \, \pi \, 10 \, . \doteq 12\,600 \text{ kg};$$

unter der Annahme, dass dieser Druck durch einen Weg $= {}^2/_3$ der Blechstärke zu leisten ist, wird

$$A = {}^2/_3 \cdot \frac{10}{1000} \cdot 12\,600 = 84 \text{ mkg}.$$

Es darf nicht Wunder nehmen, dass bei Benutzung meiner Coëfficienten der kleinste Werth gefunden wird, es ist dies vielmehr ganz natürlich, weil am Versuchsapparate die Widerstände direct ermittelt wurden, während in den Hartig'schen Formeln die passiven, sehr beträchtlichen Widerstände der Werkzeugmaschine mit enthalten sind und es wahrscheinlich ist, dass der Nutzeffect einer Werkzeugmaschine selten über 40 Proc. beträgt, gewöhnlich wohl noch weniger.

$\delta_1 = 40$ mm und $b = 1$ m gefunden werden, wenn $\varphi = 9^1/_2{}^0$ beträgt, so findet man

$$A' = 40^2 \,.\, 11{,}69 = 18\,704 \text{ mkg},$$

wobei allerdings die Blechstärke bezüglich ihres Einflusses auf den Hub vernachlässigt, andererseits aber die Maximalkraft als während des ganzen Weges $b\,tg\,\varphi$ als wirkend angenommen wurde, was weder beim Beginn noch am Ende des Schnittes der Fall ist. Der Einfluss dieser beiden Umstände hebt sich nahezu auf und ist besonders bei langen Blechen geringfügig.

Prof. A. Vavra hat Versuche über den Schnittwiderstand in der Oesterr. Zeitschrift für Berg- und Hüttenwesen 1883, S. 629 u. w. (Nr. 39 bis 51) veröffentlicht. Er reducirte den Schnittwiderstand auf 1 mm Länge des Messers und gelangte zu dem Schlusse (S. 663): „Für den gewöhnlichen guten Zustand der Scheere kann man den mittleren specifischen Widerstand, wenn das Material quer zur Faser geschnitten wird (in Annäherung an die Versuchsreihe 3, Tabelle VIII) mit 275 kg pr. 1 mm Schnittlänge annehmen und danach die Grösse der beiden Motoren bestimmen.“ Es ist natürlich, dass dieser Satz nur Bedeutung haben kann, wenn die gewöhnlichen Blechstärken gemeint sind, denn mit diesen ändert sich der Widerstand unter sonst gleichen Umständen, und zwar, wie wir gezeigt haben, proportional dem Quadrate derselben; Vavra's Zahl hat daher nur beschränkte Bedeutung. Die bezogene Versuchsreihe 3 (S. 631) fand mit Eisenplatten von $25^1/_2$ mm Dicke statt, der Schneidwinkel betrug nur $4^0\,7^1/_2{}'$. Die nothwendige Arbeit wurde aus dem Geschwindigkeitsverluste des Schwungrades bestimmt, war also Bruttoarbeit, d. h. Arbeit des Schneidens mehr Reibungsarbeit der Maschine. Für $\varphi = 5^1/_2{}^0$ finden wir aus der Tabelle I für $\delta = 1$, $P = 100$; die Pressung betrüge daher für

$$\delta = 25{,}5 \text{ mm}, \; P_1 = 25{,}5^2 \,.\, 100 = 65\,025 \text{ kg}.$$

Die Länge, in welcher die Schneide mit einer 25,5 mm dicken Platte bei $5^1/_2{}^0$ Schneidwinkel in Berührung ist, findet sich aus

$$l \,.\, sin\, 5^1/_2{}^0 = 25^1/_2 \text{ mm}$$

mit

$$l = \frac{25{,}5}{0{,}096} = 265 \text{ mm},$$

und der Druck auf 1 mm Schneidelänge wäre

$$p = \frac{65\,025}{265} = 245 \text{ kg},$$

mithin herrscht eine sehr gute Uebereinstimmung. Allerdings ist $\varphi$ bei Vavra's Versuchen kleiner gewesen ($4^0\,7^1/_2{}'$), wodurch $l$ ca. 360 mm würde, aber auch der Druck hätte dann einen grösseren Werth erlangt, nämlich ca. 86 500 kg*), so dass auf den Millimeter Schneide ein Druck von ca. 240 kg entfiele.

---

*) Der Werth 86 500 resultirt für $\varphi = 4^0\,7^1/_2{}'$ unter der nach Tabelle II erlaubten Annahme, dass die Arbeitsgrössen für $\varphi = 5^1/_2{}^0$ und $\varphi = 4^0\,7^1/_2{}'$ gleich

Jedenfalls geben die Versuche im Kleinen zuverlässigere Werthe als die im Grossen, weil letztere noch viel mehr von schwer zu taxirenden Fehlerquellen beeinflusst sind.

Ueber den Einfluss des Eckens und andere Hindernisse. Von überraschendem Einflusse auf den Schnittwiderstand ist das Ecken, d. h. jener Reibungswiderstand des Schubers oder Schlittens, welcher das obere Scheerblatt trägt, und welcher auftritt, wenn seitliche Schübe vorhanden sind. Ist $\varphi = 0$, dann ist sowohl die drückende Kraft als der Widerstand vertical und ein Ecken tritt seltener ein. Je grösser jedoch $\varphi$ wird und je weniger in der Mitte des Scheerblattes der Schnitt erfolgt, um desto grösser ist die Kraft, welche den Schlitten zu verdrehen strebt, und desto bedeutender macht sich selbst bei dem Anscheine nach hinreichend geführtem Schlitten das Ecken bemerklich.

Bei Schmiedeisenblech von 0,69 mm Dicke genügten in der Mitte des Scheerblattes bei $\varphi = 5^1/_2{}^0$ 70 kg Druck, während sich der Widerstand, das Blechstreifchen ganz an die linke Seite geschoben, also ca. 20 mm aus der Mitte, auf 137 kg steigerte. Ein Kupferblech, welches in der Mitte mit 35 kg widerstand, leistete an der Ecke der Schneidbacken 88 kg Widerstand; bei einem anderen stellten sich die Zahlen wie 32 : 73. Es sind daher bei der Construction der Scheeren sehr gute Führungen zu geben und bei langen Schlitten die drückende Kraft beiderseits zur Wirkung zu bringen, nicht in der Mitte allein.

Ein anderer wichtiger Punkt ist der dichte Anschluss der Scheerbacken aneinander. Bei den gemachten Versuchen wurde diesbezüglich sehr genau rectificirt, wobei die Dicke eines Seidenpapiers bereits merklichen Einfluss beim Schnitte dünner Bleche aufwies. Die angegebenen Zahlen beziehen sich ausschliesslich auf richtig gestellte Scheerbacken.

Fig. 27.

Doch selbst dann, wenn dieselben richtig gestellt sind, braucht man nur das zu schneidende Blech, wie in Fig. 27 angedeutet ist, nach abwärts abzubiegen, und man bekommt sogleich wesentlich höhere Angaben, z. B. statt 58 kg 90 kg oder statt 27 kg 46 kg u. s. w. Tritt also Ecken ein, oder berühren sich die Scheerblätter nicht dicht, dann mehren sich die Widerstände leicht über das Doppelte des normalen Widerstandes.

## 10. Sprengen von Cementmassen durch Wasserdruck.

Die Probestücke wurden aus 250 Gewichtstheilen Radotiner Cement, 750 Theilen Normalsand und 100 Theilen Wasser durch Einstampfen in eigens hierfür gemachten kleinen Holzkistchen hergestellt. Beim Ein-

sind. Unter dieser Annahme stehen die Pressungen im umgekehrten Verhältnisse zu den Wegen, beziehungsweise zu den Tangenten der Winkel

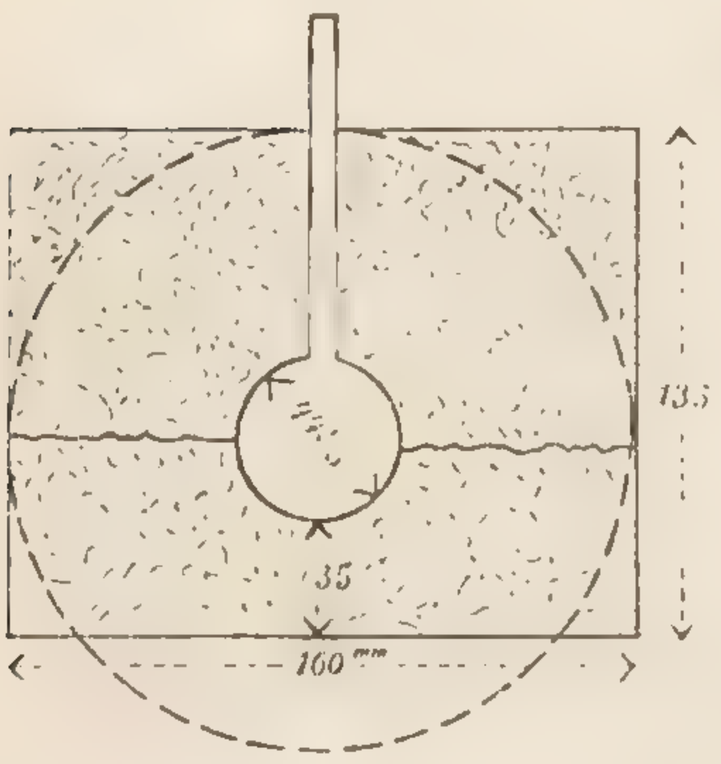
$$66025 \,.\, tg\, 5^1/_2{}^0 = x \,.\, tg\, 4^0\, 7^1/_2{}',$$

woraus sich $x = 86500$ ergiebt.

stampfen wurde eine mit einem Holzstiel versehene Wachskugel in entsprechender Lage in die Cementmasse gebracht. Nach 24stündigem Erhärten an der Luft wurden die Brettchen entfernt und die Cementstücke, welche annähernd die Form von Würfeln hatten, durch 28 Tage in Wasser erhärten gelassen. Die linearen Abmessungen sowohl der Cementkörper als der Kugeln standen annäherungsweise im Verhältnisse 1:2, desgleichen waren die Wachskugeln diesem Verhältnisse entsprechend eingesetzt.

Nachdem die Cementmassen lufttrocken waren, wurden die Wachskugeln ausgeschmolzen und kurze Stücke Gasröhren so mit einer Mischung von Sand und Wasserglas eingekittet, dass dieselben mittels Verschraubung mit dem Druckrohre einer mit Windkessel und Manometer versehenen kleinen Pumpe verbunden werden konnten. Trotzdem das Innere des Hohlraumes mit Wachs überzogen war, so sickerte das Wasser bei langsamem Pumpen doch etwas durch die Cementkörper durch, und es war deutlich wahrnehmbar, dass man bei langsamem Pumpen und öfterem Unterbrechen desselben die Sprengung bei niederer Spannung bewerkstelligen konnte, dass das Resultat daher ziemlich bedeutend in der Hand des Experimentators lag.

Fig. 28.




Die Stücke der Dimensionen Fig. 28 barsten bei 12, 10 u. 18 Atmosph.
jene der halben linearen Abmessungen „ „ 13, 9 „ 15½ „

Es mag hier bemerkt werden, dass jenes Stück, welches bei 10 Atmosphären barst, bei einem Versuche, bei welchem die Einkittung des Rohres ausbrach, bereits den Druck von 13$^{e}$ ausgehalten hatte. Der Bruch erfolgte in der Regel quer durch, wie die Fig. 28 andeutet. Die Mittelwerthe sind 13,3 und 12,5, stimmen daher gut überein. Man ist berechtigt zu sagen, dass die geometrisch ähnlichen Stücke, bei welchen auch die Abmessungen der Hohlräume im Grundverhältnisse stehen, bei gleichen inneren specifischen Pressungen bersten. Der Gesammtdruck ist das Product aus der Fläche des Hohlraumes mal dem specifischen Druck, wir haben also

$$P : P_1 = \sigma f : \sigma f_1 = f : f_1 = 1 : a^2,$$

mithin ist das Gesetz der proportionalen Widerstände auch durch diese Experimente bestätigt.

Es ist nicht uninteressant, die hier beanspruchte Berstungsfestigkeit mit der absoluten Festigkeit, welche für die angewendete Cementmasse nach 28tägigem Erhärten unter Wasser zu 17—23 kg angegeben wird, zu vergleichen.

Der Querschnitt der Kugel oder des Hohlraumes betrug

$$\frac{4{,}45^2 \,.\, 3{,}14}{4} = 15{,}5 \text{ qcm.}$$

Der Bruchquerschnitt betrug

$$16 \times 16 - 15{,}5 \doteq 240 \text{ qcm.}$$

Der Totaldruck senkrecht zur Bruchfläche betrug

$$15{,}5 \times 13 = \mathbf{201} \text{ kg.}$$

Nach Lamé's Formel für die Berstungsfestigkeit von Hohlkugeln ist der zulässige specifische Druck im Innern der Hohlkugel $p$, wenn $k$ die zulässige specifische Spannung, $r$ der Radius des Hohlraumes, $\delta$ die Wandstärke bezeichnet, gegeben durch die Gleichung:

$$p = 2\,k\,\frac{(r+\delta)^3 - r^3}{(r+\delta)^3 + 2r^3}.$$

Zuvörderst sieht man, dass dieselbe dem Gesetze der proportionalen Widerstände völlig entspricht, denn $k$ hängt vom Materiale ab und ist für ein bestimmtes Material eine constante Grösse, der Werth des Bruches aber ist bei geometrisch ähnlichen Verhältnissen eine Constante, daher auch $p$ einen constanten Werth für gleiches Material und geometrisch ähnliche Verhältnisse erlangt.

Denken wir uns in Fig. 28 eine Kugel, wie die punktirte Linie andeutet, eingeschrieben, so müsste selbe jedenfalls eher zum Bruche kommen, als das prismatische Stück, weil bei ihr der Bruchquerschnitt ein kleinerer ist.

Wir erhalten

$$r = 2{,}2 \text{ cm}, \quad \delta = 5{,}8 \text{ cm};$$

$k$ setzen wir gleich 17 kg, der Zugfestigkeit, so wird

$$p = 2 \,.\, 17 \,.\, \frac{512 - 10{,}7}{512 + 21{,}3} = 31{,}6,$$

d. h. es hätte der Bruch erst bei 31,6 Atmosphären Druck erfolgen sollen, statt bei 13,3 bezw. 12,5 Atmosphären.

In dieser bedeutenden Differenz dürfte aber weniger ein Fehler des Lamé'schen Coëfficienten als die Bestätigung der Wahrnehmung zu erblicken sein, dass die Festigkeit der Cementmasse aus 1 Theil Cement und 3 Theilen Sand durch die Einwirkung des Druckwassers litt.

## 11. Walzversuche.

Der Verein deutscher Eisenhüttenleute hat durch eine Commission Versuche über den Kraftverbrauch beim Walzen von Stahl und Eisen anstellen lassen*), auf Grund deren das Commissionsmitglied Herr Ingenieur E. Blass eine Theorie des Walzprocesses aufgestellt hat.**) Die Walzversuche

*) „Stahl und Eisen", 1881, S. 57 (Heft 2).
**) Ebendaselbst 1882, Heft 7.

wurden leider nicht unter Anwendung geometrisch ähnlicher Verhältnisse ausgeführt, wohl zumeist deshalb nicht, da die Walzen wie sie vorhanden waren zur Verwendung kamen. Aus diesem Grunde können diese Versuche keinen direkten Beleg zur Bekräftigung des Gesetzes liefern, dennoch geben sie denselben indirect dadurch, dass die Formeln, zu welchen Herr Ingenieur E. Blass gelangte, dem Gesetze der proportionellen Widerstände entsprechen. Herr Blass kannte meine Arbeiten und sprach es geradezu aus, dass beim Walzen das Gesetz der proportionalen Widerstände ebenfalls Geltung habe.

## 12. Reibungsarbeit.

Die vielseitig und seit langer Zeit über Reibungswiderstand und Reibungsarbeit vorliegenden Versuchsergebnisse führten zu allbekannten einfachen Beziehungen. Hier ist natürlich nur von der dynamischen Reibung, d. h. jener Reibung die Rede, welche sich dem Gleiten der Aussenflächen zweier unter Druck gegen einander gepresster Körper entgegenstellt.

Sind diese Aussenflächen geometrisch ähnlich und materiell gleich, so erhalten wir bei gleichen specifischen Pressungen $\sigma$ an den sich reibenden Flächen: $\sigma O = P$ und $\sigma O_1 = P_1$, daher auch

$$P : P_1 = O : O_1 ;$$

bezeichnet man den Reibungscoëfficienten mit $\varrho$, so ist $\varrho P$ bezw. $\varrho P_1$ der Reibungswiderstand $R$ bezw. $R_1$, und hierfür gilt gleichfalls die Proportion

$$R : R_1 = O : O_1 ,$$

entsprechend dem Gesetze der proportionalen Widerstände.

Diese Relation leistet zugleich auch, wie wohl leicht ersichtlich ist*), den bekannten Formeln für die Reibung Genüge.

Denkt man sich die geometrisch ähnlichen Flächen $O$ und $O_1$ Wege $s$ und $s_1$ zurücklegen, welche im Grundverhältnisse $1 : a$ stehen, dann werden die Reibungsarbeiten $Rs = A$ und $R_1 s_1 = A_1$ sich durch die Proportion

$$A : A_1 = 1 : a^3 ,$$

bestimmen, d. h. es werden diese Reibungsarbeiten gleichfalls dem Gesetze der proportionalen Widerstände entsprechen.

Wir haben bei der theoretischen Begründung des Gesetzes S. 33, sowie bei Besprechung des Walzens S. 30 darauf hingewiesen, dass an den analogen Stellen des nach den Anforderungen des Gesetzes der proportionalen Widerstände deformirten Arbeitsstückes die gleichen specifischen Pressungen herrschen. Da ferner eine Bedingung des Gesetzes die übereinstimmende Formänderung in gleichen Zeiten ist, so stehen

*) Der Anfänger braucht nur die bekannten Formeln bei geometrisch ähnlichen Oberflächen der sich aneinander reibenden Körper und gleichem specifischen Druck für $R$ bezw. $R_1$ aufzulösen und die Werthe ins Verhältniss zu setzen.

die Wege der correspondirenden Punkte des Arbeitsstückes stets auch im Grundverhältnisse, wie die obige Bedingung verlangt; erzeugt daher, wie beim Walzen, der Druck des Arbeitsstückes gegen daran gleitende Theile des Werkzeuges einen Reibungswiderstand und erfordert derselbe zu seiner Ueberwindung eine Reibungsarbeit, so entspricht dieselbe gleichfalls dem Gesetze und stört die Ergebnisse in ihrem Verhältnisse zu einander nicht. Da die Reibungswiderstände von grossem Einflusse sein können, so muss man im einzelnen Falle wohl im Auge haben, ob den angegebenen Bedingungen entsprochen ist.

Im Vorstehenden wurde absichtlich von geometrisch ähnlichen Oberflächen, nicht von geometrisch ähnlichen Körpern gesprochen, denn hätten wir Körper betrachtet, so käme das Eigengewicht jenes Körpers, welcher seiner Lage nach unter Umständen allein den Druck zwischen den Flächen bedingt und diesen Druck dem Maasse nach bestimmt, in Betracht. Geometrisch ähnliche Körper gleicher materieller Beschaffenheit können aber durch ihre ähnliche Aussenfläche nie gleiche specifische Drucke, herrührend vom Eigengewichte, übertragen; sondern diese Drucke (mit $\sigma$ und $\sigma_1$ bezeichnet) müssten im Verhältnisse

$$\sigma : \sigma_1 = \frac{V}{F} : \frac{V_1}{F_1} = 1 : a$$

stehen, und dann verhält sich

$$R : R_1 = 1 : a^3$$

und

$$A : A_1 = 1 : a^4;$$

wir kommen hier zur gleichen, mit dem Gesetze der proportionalen Widerstände in keinem Zusammenhange stehenden Beziehung, welche bereits S. 30 erwähnt wurde und auf welche wir S. 74 wieder stossen werden.

Das Gesetz der proportionalen Widerstände vergleicht nur übereinstimmende Formänderungen; als solche, als übereinstimmende Formänderung, kann aber die infolge Reibung entstehende Abnutzung nur bei gleichem specifischen Drucke angesehen werden. Bei allen Darlegungen dieser Schrift wurde stets vorausgesetzt, dass das Gewicht des Arbeitsstückes auf die Formveränderung keinen directen merklichen Einfluss übe, sondern die Formänderung durch äussere Arbeit bewirkt werde.

## 13. Sanddruck-Versuche.

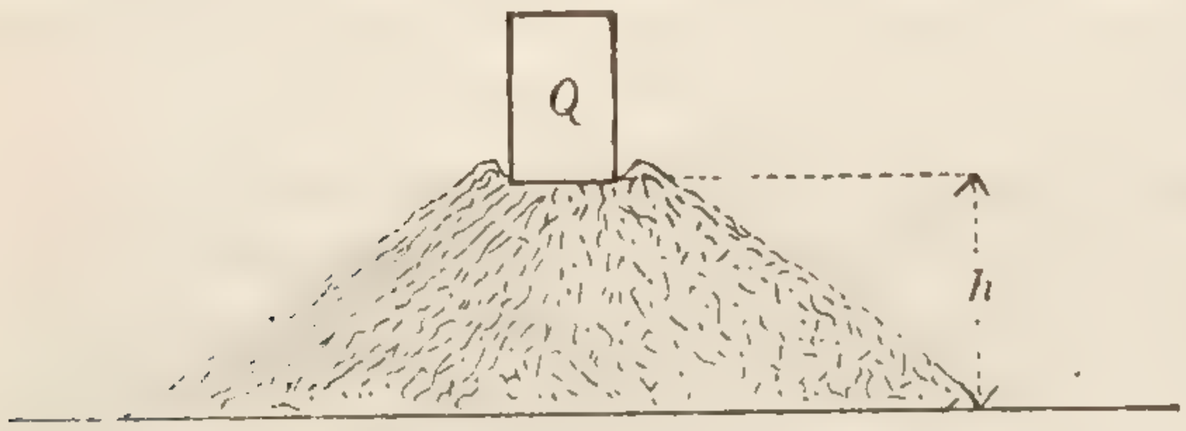
Die vorgenommenen Versuche waren zweierlei Art. Bei der ersten Gruppe wurde in ein parallelepipedisches Holzgefäss (Kasten) eine Sandschichte von bestimmter Höhe gegeben, ein Holzcylinder auf den Sand aufgesetzt und direct mit Gewichten belastet. In dem Boden des Sandkastens befand sich eine kreisförmige Oeffnung und in derselben wurde ein dieselbe schliessender Stempel so eingesetzt, dass derselbe, wenn von unten gegen oben gedrückt, die Oeffnung verschloss.

Der Stempel war vertical geführt und mit einer Wage so verbunden, dass er mit bestimmtem Aufdrucke gehalten wurde. Ueberwog nun der auf seine Oberfläche ausgeübte Sanddruck das Auflagegewicht an der Wage, so konnte die Bewegung des Stempels durch einen Fühlhebel ersichtlich gemacht werden. Fiel die Achse des Stempels in die Verlängerung der Achse des Druckcylinders, so wirkte eine bestimmte Pressung natürlich am kräftigsten; war zwischen beiden Achsen ein horizontaler Abstand, so nahm die Pressung auf den Stempel mit Zunahme des Abstandes sehr rasch ab. Für jede bestimmte Stellung von Stempel und Presscylinder und jede bestimmte Pressung wurden mit stufenweise abnehmenden Auflagen auf der Wage mehrere Versuche gemacht, bis man endlich jene Auflage fand, von welcher an der Sanddruck eine Bewegung des Fühlhebels zur Folge hatte. Diese Versuche waren die Behelfe zu einer Arbeit Prof. Steiner's über die Druckvertheilung bei Fahrbahnen (s. Handbuch für Ingenieurwissenschaften II, 2, S. 194 ff.), und sie bestätigten auch annäherungsweise das Gesetz, d. h. bei geometrisch ähnlichen Verhältnissen pflanzten sich die Pressungen derart fort, dass die gleichen activen specifischen Pressungen an den auf den Sand drückenden Flächen auch die gleichen specifischen Pressungen des Sandes auf die correspondirenden Flächen der Wände (des Bodens) hervorriefen.

Eine andere Versuchsreihe ist durch die nachstehende Figur 29 versinnlicht. Nimmt man zwei Sandmengen, z. B. im Verhältnisse 1 : 8, und schüttet man sie so auf, dass sie zwei Kegel unter dem natürlichen Böschungswinkel bilden, setzt man ferner mit aller Vorsicht Gewichte auf, deren untere Endflächen

$$f : f' = 1 : 4$$

Fig. 29.




sich verhalten und welche selbst zu einander in diesem Verhältnisse stehen, so werden sich die Höhen, bis zu welchen die Gewichte einsinken, näherungsweise wie 1 : 2 verhalten.

Die Fehler, welche sich hierbei ergaben, schwankten zwischen 10 und 25 Proc.; aber die Versuche zeigten, dass stets bei der kleineren Sandmenge das Einsinken verhältnissmässig tiefer erfolgt, eine Erscheinung, welche wahrscheinlich von dem Einflusse des Sandgewichtes einerseits und wohl auch von jenem der Luft, welche zwischen dem Sande enthalten ist und bei der kleineren Masse leichter entweichen kann, herrührt. Weil die Fehler stets in demselben Sinne auftraten und, wie oben angegeben, nicht unbedeutend waren, so können die Versuche der zweiten Gruppe insolange nicht als Beweis der Anwendbarkeit

des Gesetzes auf Sand angesehen werden, als es nicht gelingt, die Fehlerquellen zu beseitigen, oder doch ihren Einfluss völlig klar zu legen.

## 14. Elastische Deformation von tropfbar flüssigen und ausdehnsam flüssigen Körpern.

Denkt man sich in zwei geometrisch ähnlichen Gefässen parallelepipedischer oder cylindrischer Form Gase oder tropfbare Flüssigkeiten eingeschlossen, und zwar derart, dass nach oben Kolben den Abschluss bilden, deren Höhenlage für die Anfangsstellung gleichfalls der vorausgesetzten geometrischen Aehnlichkeit entspricht, und denken wir uns beide Flüssigkeiten bei Beginn des Vergleiches in demselben Zustande, so wirken die Flüssigkeiten auf beide Kolben mit dem gleichen specifischen Drucke. Lassen wir nun beide Kolben gleichzeitig so sich niederbewegen, dass die geometrische Aehnlichkeit in jedem Vergleichsmomente fortbesteht; so stehen die Flüssigkeits- (oder Gas-) Volumen stets in demselben Verhältnisse und — unter sonst gleichen Umständen, welche sich bei Gasen vorzüglich auf die Temperatur beziehen — herrscht in jedem Vergleichsmomente in beiden Gefässen auch derselbe specifische Druck. Nennen wir den variablen specifischen Druck $\sigma$, so ist die Arbeit der Kolben gegeben durch

$$A = \int_{h_0}^{h_1} \sigma f \, dh$$

und

$$A' = \int_{h'_0}^{h_1'} \sigma f' \, dh'.$$

Die Kolbenflächen sind constant, ferner ist

$$dh' = a\,dh,\ h_0' = a h_0 \text{ und } h_1' = a h_1;$$

wir erhalten

$$A : A' = f \int_{h_0}^{h_1} \sigma \, dh : f' a \int_{h_0}^{h_1} \sigma \, dh = 1 : a^3,$$

d. h. das Gesetz der proportionalen Widerstände hat auch für die elastische Formveränderung von Gasen und Flüssigkeiten Geltung, wenn es hier auch keinen Gebrauchswerth besitzt.

Prof. Fr. Steiner hat dies in der bereits einmal citirten Abhandlung*) in anderer Weise zuerst bewiesen.

Da wir für Gase das Mariotte'sche und Poisson'sche Gesetz haben, welche viel weiter gehend sind, andererseits elastische Formveränderungen bei tropfbaren Flüssigkeiten höchst selten in Frage kommen, so

*) Dingler's polyt. Journal 1884, Bd. 251, S. 291.

hat für diese Körper das Gesetz der proportionalen Widerstände keine praktische Bedeutung.

In der allgemeinen Form, in welcher wir das Gesetz der proportionalen Widerstände gegeben haben, gilt es für tropfbare Flüssigkeiten nicht, weil bei diesen die Arbeit für die Verschiebung der Massentheilchen aneinander bei irgend welcher Formänderung gegenüber jener Arbeit, welche ein Heben der Flüssigkeit erfordert oder ein Sinken derselben liefert, meist verschwindet.

Bei einer Formänderung der Flüssigkeiten — wenn dieses Wort hier gebraucht werden darf — kommen zwei Arbeitsgrössen in Betracht; die eine, welche erforderlich ist, den Schwerpunkt der Flüssigkeit zu heben, die zweite, welche zur Verschiebung der Massentheilchen aneinander verbraucht wird. Die erstgenannte Arbeitsgrösse steht bei geometrisch ähnlichen Verhältnissen im Verhältnisse von $1 : a^4$, die zweite, meist geringfügige, im Verhältnisse $1 : a^3$. Daher könnte das Gesetz der proportionalen Widerstände bei tropfbaren Flüssigkeiten nur zur Ermittlung dieses zweiten Arbeitsantheiles, der Verschiebungsarbeit der Theilchen aneinander, verwendet werden.

Der Inhalt dieses Abschnittes hat für die verschiedensten Formänderungen fester Körper den experimentellen Beweis der Richtigkeit des Gesetzes erbracht; die Versuche mit Sand hingegen zeigen das Vorhandensein störender, noch nicht völlig erklärter Nebenumstände, und für Gase und tropfbare Flüssigkeiten hat das Gesetz nur für elastische Formänderungen seine Gültigkeit. Aber auch die Beschränkung derselben auf feste Körper gestattet die Anwendung desselben in zahllosen Fällen der Festigkeitslehre und besonders der mechanischen Technologie; denn die Resultate des im Kleinen mit grosser Genauigkeit durchführbaren Experiments gestatten eine rechnungsmässige Verwerthung für die Bestimmung des Kraft- bezw. Arbeitsbedarfes im Grossen. Von Werth ist ferner die durch das Gesetz gegebene Anleitung zur Aufstellung unmittelbar brauchbarer Coëfficienten, wie solche bezüglich des Schneidens von Blech gegeben wurden. In ähnlicher Weise wären alle Arbeitsoperationen der mechanischen Technologie experimentell zu behandeln, — eine Arbeit, welche die einem Menschen gegebene Arbeitskraft bei Weitem übersteigt, welche aber gemacht werden muss, soll die Technologie auf bessere Grundlagen gestellt werden. Die geehrten Fachgenossen zu solchen Arbeiten anzuregen, ist ein Theil des Zweckes dieser Schrift.

Die vorstehenden Experimente beweisen zugleich auch, dass geringe Verschiedenheiten in den angewendeten Geschwindigkeiten bei den benutzten Versuchsmaterialien von keinem bedeutenden Einflusse auf die Ergebnisse sein können; denn wären sie dies, so hätten die Experimente nicht eine so gute Uebereinstimmung mit dem Gesetze ergeben können, ohne dass die Bedingung gleicher Geschwindigkeit auf das genaueste

erfüllt worden wäre. — Vicat und Barba haben bei ihren Versuchen auf diese Bedingung keinen Werth gelegt und könnten sie nur zufällig erfüllt haben, und auch ich habe ihr nur näherungsweise entsprochen. — Die weitere Behandlung der hierher gehörigen Fragen ist dem nächsten Abschnitte überlassen.

---

## VI. Abschnitt.

# Ueber das Verhalten verschiedener Materialien bei gleicher Einwirkung äusserer Kräfte auf congruente Probestücke und über den Einfluss der Geschwindigkeit der Formänderungen auf den Widerstand oder die Beziehungen von Druck und Stoss.

Das Gesetz der proportionalen Widerstände setzt gleiche materielle Beschaffenheit und gleiche Geschwindigkeit der Formänderung voraus und gilt zunächst nur dann, wenn diese Bedingungen erfüllt sind; aber deshalb drängt sich die Frage auf, wie sich die verschiedenen Materialien bei derselben Inanspruchnahme verhalten, und andererseits die Frage, wie sich dasselbe Material bei den gleichen Formveränderungen verhält, wenn diese mit verschiedenen Geschwindigkeiten stattfinden.

Zunächst treten bei gleichartigem Experimentiren mit verschiedenen Materialien zahlreiche, übereinstimmende Erscheinungen auf. Die Art der Formänderung ist für alle jene Materialien, welche man bildsame nennt, überraschend gleichartig, während die spröden nur eine sehr geringe elastische Formänderung zulassen und so nahe an der Elasticitätsgrenze zum Bruche gelangen, dass man eine bleibende Formänderung von leicht wahrnehmbarer Grösse nicht hervorbringen kann oder vielmehr gewöhnlich glaubt, nicht hervorbringen zu können. Für die unter dem Einflusse äusserer Kräfte bei bildsamen Körpern stattfindende Verschiebung der Massentheilchen hat Treska die treffende Bezeichnung „Fliessen fester Körper“ eingeführt*); man kann aber auch bei spröden Körpern, wenn dieselben von einer genügend festen Hülle umschlossen sind und mit dieser der Formänderung

*) Savants étrangers Vol. XIII, p. 756 und Vol. XX, p. 169.

unterworfen werden, ganz wohl von einem Fliessen der Theilchen reden, denn auch solche Körper lassen eine Verschiebung ihrer Theilchen in ganz gleichförmiger Weise wie die bildsamen Körper zu; auch spröde Körper können ihre Form bleibend verändern, ohne dass dadurch der Zusammenhang der Theilchen aufgehoben wird. Schon Professor Heim hat in seinem Werke über Gebirgsbildung*) durch geologisch-paläontologische Gründe die Behauptung gestützt, dass manche Gebirgsarten in festem Zustande, also nicht als weiche Sedimente, eine Verkrümmung der Schichten erfahren haben, und dies führte mich zu dem Versuche, Marmorcylinderchen, eingeschlossen in gut passende Hüllen aus Eisen, der Formänderung in diesen Hüllen zu unterwerfen und das deformirte Stück nachträglich zu zerschneiden, um zu sehen, wie sich der Marmor verhält.

Fig. 30.

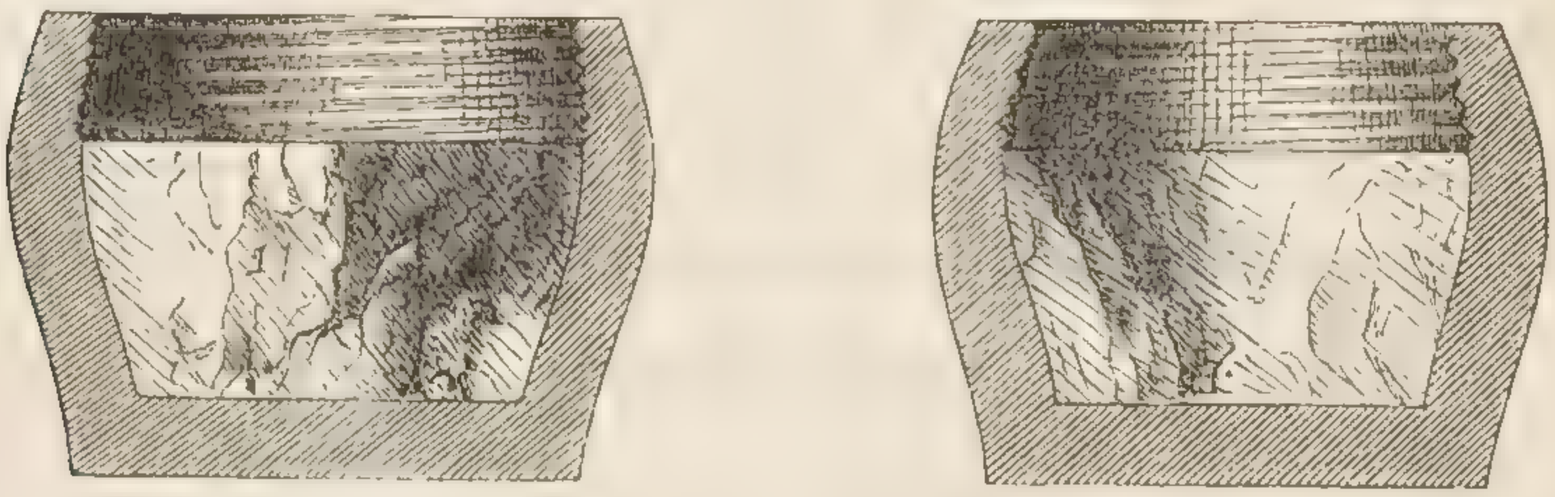
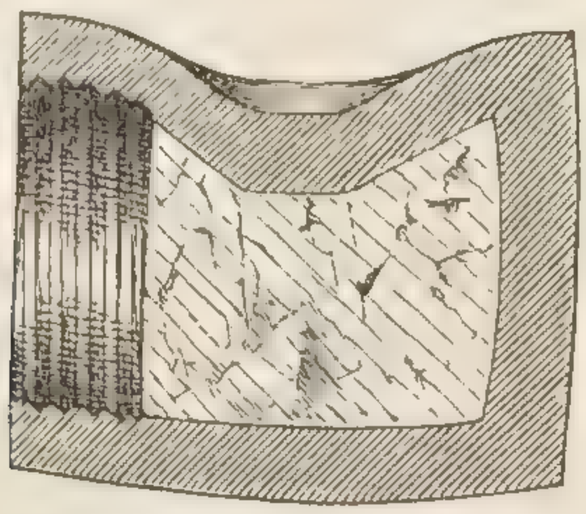


Fig. 31.



Die Deformation des Marmors fand hierbei so statt, als wäre derselbe eine plastische Masse gewesen, und nach dem Zerschneiden war ersichtlich, dass derselbe seine ursprünglichen Eigenschaften nicht geändert hatte. Fig. 30 zeigt die Deformationsform eines in der Eisenhülse zusammengedrückten Marmorcylinders, an welcher der Rutschungskegel**) wahrnehmbar ist; Fig. 31 einen mit dieser Hülse gebogenen Cylinder in natürlicher Grösse. Behufs des dichten Anschlusses an die Eisenhülle, bezw. der exacten Ausfüllung aller Hohlräume, wurde Wasser angewendet und zudem die Luft grösstentheils durch die Luftpumpe entfernt. Wenn

---

*) Heim, Albert: Untersuchungen über den Mechanismus der Gebirgsbildung. Basel, Schwabe, 1878.

**) Vergleiche meine Abhandlung „Beiträge zur Kenntniss der Mechanik weicher Körper“, Dinglers polytechn. Journal, Bd. 224, S. 467 u. w.

diese Versuche vordem auch nicht gemacht wurden, so haben sie doch wenig Ueberraschendes, weil ja Prof. Walter Spring nachgewiesen hat, dass sich die Pulver krystallinischer Körper bei Anwendung sehr hoher Pressungen im luftverdünnten Raume verschweissen lassen.*) Dass diese Pressungen zu ca. 25000 Atmosphären angegeben werden, darf nicht Wunder nehmen, denn zur Vereinigung von Pulvern zu einem festen Körper, auch dann, wenn im luftverdünnten Raume gearbeitet wird, gehört unbedingt ein sehr hoher Druck, und gewiss ein höherer, als erforderlich ist, um spröde Materialien, zwischen deren Theilchen sich muthmasslich keine Luft befindet, zum Flusse zu bringen. Uebrigens war auch bei den vorstehenden Versuchen, welche mit Tangy's hydraulischer Lochmaschine gemacht wurden, eine bedeutende Pressung angewendet worden.

Die Abhandlung von Prof. Mohr in Dresden „Ueber die Darstellung des Spannungszustandes und des Deformationszustandes eines Körperelementes und über die Anwendung derselben auf die Festigkeitslehre“ **) hat den vorliegenden Fall zwar nicht in Betracht gezogen, in ihr liegt aber doch geradezu die Erklärung desselben, und umgekehrt bestätigt das Resultat der angeführten Experimente die theoretischen Folgerungen des Genannten in schöner Weise.

Das hier Gesagte soll nur darthun, dass die Art der Formänderung, das Fliessen fester Körper, bei gleichartigen äusseren Einwirkungen auch thatsächlich gleichartig, in der Hauptsache wenigstens, erfolgt. Ein cylindrischer Körper, mag er aus Wachs, Thon, Guttapercha, glühendem Glas, Flusseisen, Kupfer etc. bestehen, erlangt, in der Achsenrichtung zusammengedrückt, die Tonnenform; dieselbe Gestalt nimmt der Marmorcylinder in der Stahlhülle an. Aber diese Uebereinstimmung ist keine vollkommene; gewisse Massen zeigen bei dieser Formänderung regelmässig auftretende Risse (Porzellanmasse, Hartblei u. a.), andere Massen behalten reine Oberflächen (Kupfer), und zwar gerade dann, wenn sie von besonderer Reinheit und Ductilität, sind. Ganz dieselben Erscheinungen treten beim Walzen, Pressen u. s. w. auf.

Die Schichtenverschiebung, welche beim Walzen geschichteter Porzellanmasse wahrnehmbar ist, und welche uns Fig. 7, Taf. II darstellt, wird sich auch in der Hauptsache bei allen walzbaren Materialien, Eisen, Kupfer etc. finden, doch treten auch hier Zerrungen auf, welche bei minder ductilen Stoffen zu unganzen Stellen führen, wie sie z. B. bei den Rohschienen aus Luppen als Schuppen auftreten. Fig. 7b stellt einen Schnitt senkrecht zur Bildebene, und eine deformirte Verticalschichte nach entfernter Nebenschichte, endlich der untere Theil von Fig. 7a das ausgewalzte Ende im Längsschnitte dar.

*) Bulletin de l'Acad. royale Belgique Ser. 2, T. 49, p. 319.

**) Civilingenieur Bd. XXVIII, Heft 2 u. 3.

Das gleichartige Verhalten der Körper von substantiell so verschiedener Natur lässt wohl den Schluss zu, dass die Deformationsgesetze im Wesentlichen die gleichen sind; wollte man daraus aber den Schluss ziehen, dass die Arbeitsgrössen für die gleichen Formänderungen bei zwei verschiedenen Materialien in einem constanten Verhältnisse stehen, so beginge man einen grossen Fehler.

Es stehen die Widerstände geometrisch congruenter Probestücke aus verschiedenen Materialien bei gleichen Formänderungen in keinem constanten Verhältnisse, die Abweichungen können sehr bedeutende sein.

Reducirt man z. B. die in Fig. 1, Taf. I gegebene Diagrammlinie für Kupfer $A$ auf $\frac{1}{20}$ ihrer Ordinaten, so erhält man die punktirt gezeichnete Linie $E$, welche auf eine längere Strecke ihres Laufes mit der Bleilinie $C$ zusammenfällt, so dass man innerhalb dieser Strecke den Widerstand des Bleies als gleich dem zwanzigsten Theil des Kupferwiderstandes bezeichnen könnte. Dieses Verhältniss ändert sich aber im weiteren Verlaufe und wird selbst 1 : 40. Aehnliches zeigt der Vergleich der Diagramme $A$, $B$ und $D$.

Es erklärt sich diese befremdende Thatsache, welche durch Schlagversuche gleichfalls bestätigt wurde, dadurch, dass dieselben Formveränderungen in den Spannungszuständen verschiedener Materialien verschiedene Aenderungen herbeiführen, oder mit anderen Worten: durch dieselbe Formänderung ändert sich die Beschaffenheit der Materialien in verschiedener Weise. Hiermit wird nichts Neues gesagt, denn Jedermann weiss, dass sich z. B. Kupfer hart schlagen lässt, Blei nicht, aber es verdient die Thatsache doch ausdrücklich auch an den gegebenen Diagrammen constatirt zu werden, um so mehr, als Fig. 5, Taf. I, hierzu einen weiteren schlagenden Beleg liefert.

Es wurde oben gesagt, dass durch die Deformationen in dem deformirten Materiale Spannungen entstehen, welche die für eine bestimmte Formänderung erforderliche Pressung sehr wesentlich beeinflussen. Fig. 5, Taf. I, macht dies besonders deutlich. Diesem Versuche wurden 3 Kupfercylinder von $h = d = 18$ mm unterworfen und in folgender Weise behandelt. Der Cylinder I wurde einem Drucke von 5000 kg unterworfen und lieferte Punkt 1 der Curve $A$, hierauf wurde derselbe ausgeglüht und abermals (kalt) derselben Pressung unterworfen, er gab Punkt 1′; wieder ausgeglüht und ebenso belastet lieferte er Punkt 1″, endlich Punkt 1‴. Der Cylinder II, ebenso bei 10000 kg behandelt, lieferte die Punkte 2, 2′, 2″ und 2‴; der Cylinder III bei 15000 kg die Punkte 3, 3′, 3″, 3‴. Als vierter Cylinder wurde ein solcher mit $d = h = 15$ mm benutzt, im Uebrigen ebenso behandelt. Die effectiven Pressungen waren 15000 kg, was nach dem Gesetze der proportionalen Widerstände umgerechnet 21600 kg gab. Man erhielt die Punkte 4, 4′, 4″ und 4‴. Die zusammengehörigen Punkte durch continuirliche Linien verbunden,

lieferte unsere Figur, aus welcher ersichtlich ist, dass bei viermaligem Ausglühen schon ein Druck von 11800 kg (Punkt *a*) dieselbe Formänderung bewirkt, welche 21600 kg sonst zu Wege brachten. Durch jedes Ausglühen werden die ins Material gelangten Spannungen behoben und dieselbe Pressung vermag wieder neu, wenn auch stets minder ausgiebig, die Form zu ändern. Würde man die Linie *D* (Fig. 5, Taf. I.) mit der Bleilinie *C* Fig. 1 in Vergleich setzen, so würde man finden, dass das so behandelte Kupfer nur ca. 11 mal so widerstandsfähig wie Blei ist. An diesen wenigen Beispielen, welche keine Grenzwerthe geben, ist mithin gezeigt worden, dass das Verhältniss des Deformationswiderstandes von Blei und Kupfer zwischen 1:11 und 1:40 wechselt. Will man daher betreffs des Arbeitswiderstandes der verschiedenen Materialien Verhältnisszahlen aufstellen, so können dies nur ganz beiläufige Näherungszahlen sein, oder man muss sie für specielle Deformationen suchen und nur in diesem beschränkten Kreise verwerthen.

**Beiläufiges Verhältniss der Deformationsarbeiten oder Arbeitswiderstände einiger Materialien bei Druckproben, bezogen auf gleiche Volumen.**

(In der Form congruenter Probestücke.)

| Material | für Schlag | für Druck |
|---|---|---|
| Flusseisen (kalt) . . . . . | — | 3000 |
| Schmiedeeisen (kalt) . . . . . | 4000—4500 | 2000 |
| „ (rothglühend) . . . . . | 600—900 | (300—400) |
| „ (gelbrothglühend) . . . . | 500 | (250) |
| Kupfer (kalt) . . . . . | 1000 | 1000 |
| „ (rothglühend) . . . . . | 550 | (250) |
| Messing (kalt) . . . . . | 800—1200 | — |
| Zinn (kalt) . . . . . | 500 | (250) |
| Blei (kalt) . . . . . | 70—90 | 20—50 |
| Guttapercha (bei 60—70° C.) . . . . . | — | 0,01—0,02 |
| Modellirthon . . . . . | — | 0,3—0,4 |
| Porzellanmasse (20—24 % Wasser) . . . | — | 0,2—0,3 |

Die in Klammern stehenden Werthe sind nicht direct aus Druckversuchen abgeleitet, sondern aus den Schlagversuchen geschätzt.

Bei Betrachtung der Tabelle wird zuvörderst auffallen und scheinbar eine Bestätigung des Gesagten liefern, dass die Verhältnisszahlen für Schlag andere sind, als jene für Druck. Doch diese Differenzen sind weit weniger in Zustandsänderungen als vielmehr wahrscheinlich darin gelegen, dass bei den Verhältnisszahlen für die Schlagarbeit als solche das Product aus activem Fallgewicht mal Hubhöhe in Rechnung oder in Vergleich gestellt wurde und der sehr wesentliche Theil dieser Arbeit, welcher in den Amboss und die Fundamente geht, nicht berücksichtigt erscheint. Unterliegt es auch keinem Zweifel, dass zu einer raschen Formveränderung ein grösseres Arbeitsquantum aufgewendet werden muss

als zu einer langsamen, weil bei der raschen Formveränderung ein grösserer Theil der Arbeit zur Erwärmung des Arbeitsstückes verbraucht wird oder als innere Arbeit verloren geht, so ist es andererseits gewiss leicht einzusehen, dass bei einem sehr widerstandsfähigen, harten, aber nicht spröden Körper ein viel grösserer Theil der Schlagarbeit in die Fundamente geht als bei einem weichen Materiale. Wenn Thon oder Blei durch einen Schlag deformirt wird, so werden die Fundamente des Schlagwerkes wenig erschüttert; deformirt man Kupfer, so ist der Schlag „härter“, bei kaltem Schmiedeeisen noch härter, bei gehärtetem Stahle wird fast die ganze Schlagarbeit in den Fundamenten und durch den Rückstoss verloren gehen. Da nun die Arbeit eines Hammers stets durch Gewicht mal Fallhöhe bestimmt ist und dieser Ausdruck für die thatsächlich aufgewendete Arbeit in Rechnung gestellt werden muss, so werden sich die Verhältnisszahlen für den Arbeitswiderstand bei Anwendung von Schlägen nothwendig um so ungünstiger stellen, je härter das Material, d. h. ein je grösserer Theil der Schlagarbeit auf die Fundamente übertragen wird. Die Erklärung, dass die Zahlen der ersten Colonne unserer Tabelle mit jenen der zweiten nicht übereinstimmen können, ist daher eine sehr einfache und jede Zahlenreihe ist nur für sich anzuwenden.

Da bei allen Vergleichen zum Zwecke ziffermässigen Ausdrucks eine Einheit oder ein Maass zu Grunde gelegt werden muss, so nahmen wir den Arbeitswiderstand des Kupfers bei Druck wie bei Schlag mit 1000 an und bezogen die Arbeitswiderstände der anderen Materialien hierauf. Hiermit ist über das Verhältniss des Arbeitswiderstandes desselben Materiales bei Druck und Schlag noch Nichts bestimmt, vielmehr diese Frage zunächst offen gelassen.

Prof. Hugo Fischer hat in seinen experimentellen Untersuchungen über Zugfestigkeit von Drähten (Civilingenieur 1884, Heft 6) die Arbeitsgrössen zum Zerreissen, bezogen auf gleiche Gewichte, in nachstehende Reihe gebracht:

| | | | |
|---|---|---|---|
| Blei | 1 | Silber | 93 |
| Platin | 8 | Eisen | 98 |
| Gold | 11 | Kupfer | 120 |
| Zinn | 13 | Nickel | 156 |
| Magnesium | 19 | Tombak | 172 |
| Stahl | 37 | Neusilber | 182 |
| Zink | 57 | Messing | 218 |
| Aluminium | 66 | Phosphorbronze | 320, |

welche, mit den Zahlen unserer Tabelle verglichen, sehr bedeutende Unterschiede im Verhältnisse der Arbeitswiderstände bei Inanspruchnahme durch Druck einerseits, durch Zug andererseits darthun. So steht nach unserer Tabelle der Arbeitswiderstand des Zinnes zu jenem des Kupfers im Verhältnisse von 1:2 und 1:4, was, auf gleiche Gewichte bezogen,

die Zahlen $1:2^1/_4$ und $1:4^1/_2$ liefern würde, während für das Zerreissen jenes Verhältniss mit 1:10 gefunden wurde.

Die Thatsache, dass die Widerstände verschiedener Materialien bei denselben Formänderungen in keinem constanten Verhältnisse stehen, beweist, dass der innere Widerstand des Fliessens der Theilchen nicht als innere Reibung im Sinne der gewöhnlichen, einfach dem Drucke proportionalen Reibung aufgefasst werden darf. Verständlich wird diese Thatsache nur unter der Annahme, dass sich die Massentheilchen der verschiedenen Materialien bei übereinstimmender äusserer Einwirkung der Art nach verschieden verhalten, d. h. dass die inneren Widerstände der verschiedenen Materialien bei denselben Formänderungen in ungleicher Weise sich verändern.

Würden manche Materialien bedeutende Volumsänderungen aufweisen, andere nicht, so wäre die erwähnte Thatsache minder auffallend. Dies ist aber nicht der Fall, denn sowohl Metalle als andere Materialien, welche frei von Hohlräumen sind, ändern ihre Dichte durch die Bearbeitung nur innerhalb sehr enger Grenzen, wie selbe durch geringe Erwärmung oder Abkühlung erreichbar sind, so dass mit grosser Annäherung von einer Constanz des Volumens gesprochen werden kann. In Bezug auf diese Frage seien nachstehende Versuche*) angeführt.

Ein Bleicylinder von 100,3 mm Höhe und 70,2 mm Durchmesser, durch Abdrehen aus einem bedeutend grösseren, mit aller Vorsicht**) gegossenen Cylinder erzeugt, ergab durch Wägung in und ausser Wasser und nach Umrechnung auf die Dichte des Wassers bei 0° (Dichte 1) sowie mit Berücksichtigung, dass der Ausdehnungscoëfficient des Bleies zu 0,0000854 pr. 1° C. angenommen werden kann,

bei 15° C. ein Volumen von 387,85 ccm,
bei 19° C. ein Volumen von 387,97 „ .

Das Gewicht betrug 4405,7 g, mithin die Dichte bei 15° C. 11,358.

Der Bleicylinder wurde auf Prof. Gollner's Festigkeits-Maschine zunächst bis zu einer Höhe von 69 mm zusammengedrückt.

Der Auftrieb des Bleies (Gewichtsverlust im Wasser) betrug bei 15° Wassertemperatur 387,590 g, es entspricht dies einem Volumen von 387,85 ccm; denn wir nehmen diese Temperatur als die Normaltemperatur an, auf welche wir das Bleivolumen beziehen wollen. Indem 1 g Wasser von 15° C. das Volumen 1,000695 besitzt, so entsprechen $387{,}59 \times 1{,}000695 = 387{,}848$ dem Volumen des verdrängten Wassers, mithin dem Volumen des Bleies von 15° Temperatur.

*) Zuerst in den Techn. Blättern 1878, S. 88 u. 1881, S. 185 veröffentlicht.

**) Hierher ist besonders das Erstarren von unten zu rechnen, dadurch erzielt, dass die Oberfläche durch eine Gasflamme erhitzt ist und zuletzt zum Erstarren gelangt.

Es ist das Volumen des (auf 69 mm zusammengedrückten) deformirten Bleies = **387,**$_{85}$ gefunden, also genau gleich dem ersten, auf 15° rectificirten Volumen.

Später fand auf derselben Maschine ein weiteres Zusammendrücken bis auf 50,0 mm Höhe statt, also auf die halbe Höhe des ursprünglichen Stückes.

Der Auftrieb betrug 387,$_{455}$ g bei 18° C. Wasser- und Bleitemperatur; dies gibt 387,$_{455}$ × 1,$_{001184}$ = 387,$_{912}$ verdrängtes Wasservolum = Bleivolum bei 18°. Reducirt man dieses Bleivolum auf 15° (unsere Normaltemperatur), so erhält man, da 387,$_{912}$ × 0,$_{0002562}$ = 0,$_{098}$ von obigem Volum abzuziehen ist, das Volumen des (auf 50 Proc. der Höhe zusammengedrückten) deformirten Bleies = **387,**$_{814}$.

Diese Erscheinung der Volumsabnahme liegt jedoch ganz innerhalb der möglichen Beobachtungsfehler.*) Dieselbe, als richtig angenommen, beträgt nur $^1/_{10000}$ des ursprünglichen Volumens.

Mit demselben Probestücke wurden weitere Versuche durchgeführt. Zunächst wurde jener bereits auf seine halbe Höhe unter der Presse deformirte Cylinder einem wuchtigen Schlage unter dem Dampfhammer (actives Fallgewicht 1339 kg, Fallhöhe 0,85 m) ausgesetzt und seine Dichte bestimmt. Hierauf wurde der Bleikuchen zersägt und sowohl von einem Segmente als von einem Mittelstücke die Dichte bestimmt, endlich ein Stück längere Zeit kräftig unter einem Handhammer von allen Seiten abwechselnd bearbeitet.

*) Zunächst mag bemerkt werden, dass durch Messung und Rechnung das Volumen nie so genau ermittelt werden kann, als dies durch die Bestimmung des Gewichtsverlustes in Wasser möglich ist. So wurde bei obigem Cylinder das Volumen durch Messung zu 388,21 ccm bei 19° C. gefunden.

Der Fehler in der Temperaturbestimmung des Wassers um 1° C. liefert in unserem Falle schon eine Differenz von 0,08 ccm (mit Zugrundelegung der von Kopp gegebenen Zahlen). Derselbe Fehler liefert bezüglich der Ausdehnung des Bleies eine Differenz von 0,03 ccm.

Wechselt der Luftdruck zwischen jenem Tage, wo die Dichtenbestimmung des nicht deformirten Stückes stattfand, und jenem Tage, wo die Dichte des deformirten Stückes bestimmt wird, um 50 mm Quecksilbersäule, so bedingt dies, da man mit Messinggewichten wiegt, auf unsern Fall bezogen eine Differenz von 0,01 bis 0,02 ccm. Genau lässt sich diese Fehlerquelle nur in Rechnung nehmen, wenn man das Volumen der Gewichte gleichfalls bestimmen würde.

Addirten sich diese Fehler, so betrüge der Gesammtfehler, falls die Temperaturbestimmung um $^1/_4{}^0$ C. fehlerhaft gewesen, 0,027 ccm, eine durchaus bemerkenswerthe Grösse.

Hierzu gesellen sich aber noch wesentliche Fehlerquellen, bedingt durch die adhärirende Luft, ferner eine geringe, durch Oxydation bedingte Gewichtszunahme und endlich der Einfluss der Temperatur auf den Auftrieb der Schale, welche mit in das Wasser versenkt wird. Hieraus folgt, dass sehr geringe Volumsänderungen, welche die Wägung ergibt, auf einer Täuschung beruhen könnten, bedingt durch die Fehlerquellen, welche den Versuchen anhaften.

Die Resultate dieser Versuche sind in nachfolgender Uebersicht zusammengestellt.

| Bezeichnung des Probestückes und Art seiner Inanspruchnahme | Dimensionen | | Gewicht in Grammen | Volumen bei 20° C. *) | Spec. Gew. bei 20° C. *) |
|---|---|---|---|---|---|
| | mm $h =$ | mm $d =$ | | | |
| 1. Bleicylinder gegossen, abgedreht | 100,3 | 70,2 | 4405,7 | 388,013 | **11,3546** |
| 2. Derselbe gepresst mit 6000 kg Totaldruck | 69 | tonnenförmig | 4406,27 | 388,023 | **11,3557** |
| 3. Derselbe gepresst mit 10000 kg Totaldruck | 50 | „ | 4406,25 | 387,969 | **11,3572** |
| 4. Derselbe unter dem Dampfhammer zu einer Scheibe geschlagen (1 Schlag, $G = 1339$ kg, $H = 0{,}85$ m) | 33,6 | Scheibe ca. 125 | 4406,15 | 388,003 | **11,3560** |
| 5. Vom Probestück 4 ein Segment vom Rande abgeschnitten | — | — | 502,45 | 44,252 | **11,3540** |
| 6. Vom Probestück 4 ein Stück aus der Mitte genommen | — | — | 298,54 | 26,2824 | **11,3590** |
| 7. Ein Stück aus der Mitte in würfelförmige Form durch kräftiges Ueberhämmern während einer halben Stunde gebracht, hierauf blank geschnitten | — | — | 147,09 | 12,942 | **11,3653** |

Diese Resultate sind um so interessanter, wenn man dieselben mit der Zahl **11,**3739 vergleicht, welche die Dichte des Probestückes Nr. 1 bei 0° C. darstellt. Es ist also selbst durch die intensivste Bearbeitung eines an sich blasenfreien Stückes nicht jene Aenderung der Dichte erzielt worden, welche einer Temperaturerniedrigung von nur 20° C. entspricht. Wird die cubische Ausdehnung für Blei pr. 1° C. zu 0,0000854 angenommen, so würde eine Temperaturerniedrigung von ca. 11° C. bereits genügen, um das specifische Gewicht des Probestückes Nr. 1 von 11,3546 auf 11,3653

*) Es wurden die Versuchsdaten auf die einheitliche Temperatur von 20° C. umgerechnet, weil diese Temperatur wenig von den Temperaturen, bei welchen die Dichten bestimmt wurden, abweicht und sonach auch der Einfluss der Ungenauigkeiten in den benutzten Umrechnungsfactoren ein sehr geringer wird. Die Variationen im Gewichte (Nr. 1 bis 4) erklären sich einerseits durch die Oxydation des Bleies, andererseits durch die Reinigung durch Abwischen mittels eines trockenen Tuches. Zur Umrechnung wurden betreffs der Dichte des Wassers die Angaben von Kopp (Karmarsch-Heeren Techn. Wörterbuch, 3. Aufl., I. Bd., S. 249) benutzt und die cubische Ausdehnung des Bleies zu 0,0000854 pr. 1° C. in Rechnung gestellt.

zu erhöhen, also auf die Dichte des überhämmerten Stückes Nr. 7 zu bringen. Wäre das Probestück Nr. 1 nicht mit jener Vorsicht hergestellt worden, dasselbe dadurch von unten auf in der Form erstarren zu machen, dass die Oberfläche des Bleies durch eine directe Flamme erhitzt und längere Zeit flüssig erhalten wurde, so wäre nie das feine, dichte Gefüge erhalten worden, und die Bearbeitung hätte, die Hohlräume füllend, eine wesentlichere Vermehrung der Dichte ergeben.

Ausser den vorstehenden, in dieser Richtung durchgeführten Versuchen dürften noch folgende zu erwähnen sein.

Mit der erwähnten Vorsicht wurde ein Bleicylinder von

$$h = 25{,}0 \text{ mm}, \; d = 57{,}0 \text{ mm} \text{ und } G = 734{,}287 \text{ g}$$

hergestellt. Sein specifisches Gewicht wurde abermals auf die Temperatur von 20° C. umgerechnet und, wohl nur durch zufällige vollständige Uebereinstimmung mit der bei Nr. 1 angegebenen Dichte, gleichfalls zu **11**,3546 gefunden.

Dieser Bleicylinder wurde in eine gut passende Stahlfassung (Presse) eingesetzt und durch 15 Stunden einem Drucke von 10000 kg unterworfen, was einer specifischen Pressung von nahe 392 kg pr. qcm entspricht. Die Dichtenzunahme war gering, es wurde das specifische Gewicht **11**,3559 gefunden. Hierauf wurde dasselbe Stück durch 20 Stunden einem Drucke von 20000 kg ausgesetzt, das specifische Gewicht betrug hiernach **11**,3591.

Es muss bemerkt werden, dass durch diesen bedeutenden Druck trotz des vorzüglich einpassenden Stahlstempels das Blei doch zwischen Wandung und Stempel auf fast 10 mm Höhe sich als dünner Grad erhob, welcher vor der Dichtenbestimmung weggeschnitten wurde.

Der relative Genauigkeitsgrad der hier gegebenen Zahlen ist ziemlich gross, der mittlere Fehler dürfte bei 0,0006 liegen; die absolute Genauigkeit stellt sich aber darum noch geringer, weil alle diese Versuche ohne Evacuirung durchgeführt werden mussten, indem ein hinreichend grosser Recipient nicht zur Verfügung stand.

Aehnliche, aber minder instructive Versuche wurden auch mit Stehbolzenstangenkupfer von Chaudoir ausgeführt. Weniger instructiv, weil dieses Material schon bei seiner Erzeugung (Walzen und Ziehen) eine kräftige Pressung erfährt, daher der Einfluss späterer Bearbeitung nicht gross sein kann.

Das erste Probestück im Gewichte von 108,487 g hatte, auf die Temperatur von 20° C. bezogen, die Dichte von **8**,8877; dasselbe Stück durch 10 Minuten kräftig überhämmert **8**,8909. Die Differenz beträgt 0,0032, etwa entsprechend der Dichtenänderung bei einer Temperaturdifferenz von 7° C.

Ein zweites Probestück von einer anderen Stange wurde in einem Stahlgehäuse hartgeschlagen; das specifische Gewicht, auf die Temperatur von 20° C. bezogen, betrug nur **8**,8727. Dieses Stück wurde hierauf aus-

geglüht, die Oxydhaut abgerieben und neuerlich das specifische Gewicht bestimmt, welches 8,8656 betrug; Differenz 0,0071. Die grösseren Differenzen zwischen den beiden ersten und den beiden letzten Angaben dürften in der verschiedenen Reinheit des Kupfers gelegen sein.

Diese Resultate sind im Grunde genommen sehr natürliche, denn aus welcher Ursache sollte sich z. B. Kupfer, Stabeisen, Stahl etc. durch die Bearbeitung noch weiter verdichten lassen, nachdem diese Materialien bei ihrer Erzeugung doch sehr intensiven Einwirkungen unterworfen wurden? Das Ausfliessen der Hohlräume wurde durch Hammerarbeit, Walzen u. dgl. bei gutem Materiale bereits vollkommen oder nahezu vollkommen besorgt, und es kann dies intensiver durch die weiteren mechanischen Mittel der Bearbeitung nur dann geschehen, wenn selbe noch kräftiger einzuwirken vermögen, was in der Regel nicht der Fall ist.

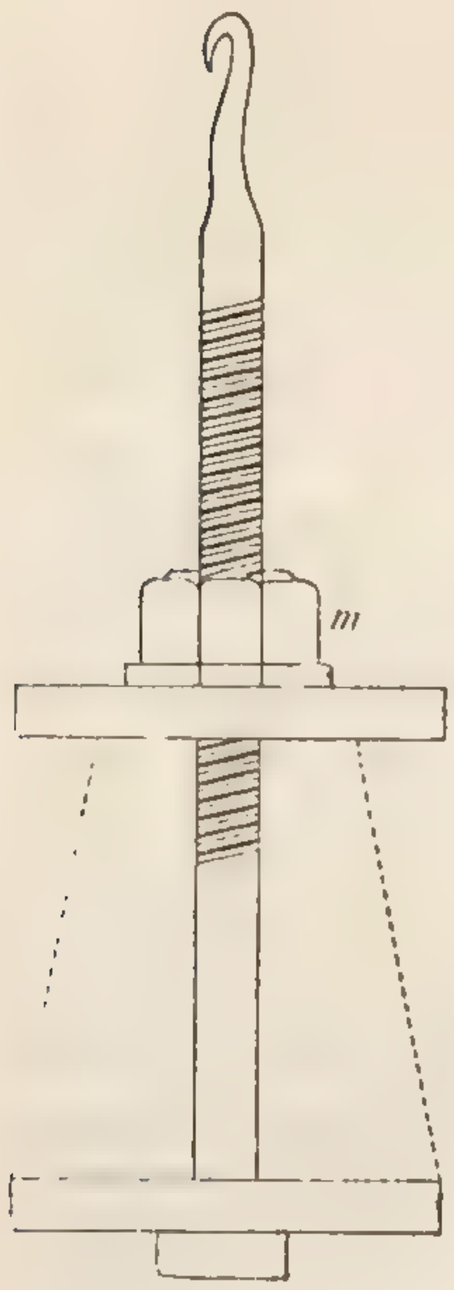
Die bedeutenden Differenzen in den Angaben der specifischen Gewichte der Metalle, z. B. bei Kupfer zwischen 7,720 und 8,965, bei Blei (auf 0° C. bez.) zwischen 11,300 und 11,445, rühren theils von dem Einflusse der Verunreinigungen, theils von Hohlräumen her, welche letzteren bei Gussstücken sehr abhängig von der Art des Erstarrens sind. Blei, Zinn, Schriftgiessermetall krystallisirt dann grob, wenn diese Metalle in gut leitende, kalte Formen gegossen werden, hingegen feinkörnig, wenn das Erstarren in der gut vorgewärmten Form sehr allmälig erfolgt. Im letzteren Falle ist das Material dichter, specifisch schwerer; im ersteren Falle kann durch die Bearbeitung das Gefüge feinkörniger und dichter gemacht werden, das specifische Gewicht nimmt dann zu, weil Hohlräume durch den Fluss der Theile geschlossen werden. Manche mit Gasarten erfüllte Hohlräume lassen sich schwer beseitigen; so gehört z. B. eine anhaltende hohe Pressung der warm gehaltenen Masse dazu, um aus weicher Guttapercha die enthaltene (durch Kneten hineingebrachte) Luft auszupressen. Ebenso spielt die in Porzellanmasse und Thon enthaltene Luft, sowie sie merkliche Bläschen bildet, eine für die Fabrikation sehr unangenehme Rolle, indem sie zu einem Springen der Waare beim Brennen Veranlassung geben kann; um sie zu beseitigen, werden diese Materialien nach eigenthümlichen Regeln geschlagen.

Von besonderem Interesse scheint hier wohl die Frage, ob elastische Körper, wie Kautschuk, wenn sie gepresst oder gezerrt werden, Volumsveränderungen aufweisen.

Diesbezügliche Versuche führte ich mit einem gebohrten Kegelstutz aus vulkanisirtem Kautschuk und mit einem Bande aus dem sogenannten „rothen Patentgummi“ aus. Das kleine Compressions- und Dehnungsapparatchen, welches durch die umstehende Figur 32 ohne weiteres verständlich ist, war bei der Dichtenbestimmung mit unter das Wasser versenkt. Wurde es zur Dehnung gebraucht, so wurde nur die Schraubenmutter *m* unter der Platte angebracht, durch entsprechende Benutzung der Mutter die Platte gehoben und das Band gespannt.

Druckversuche. Bei der Zusammendrückung des Truncus von 58,8 mm auf 49,4 mm änderte sich das Volumen bei der gewöhnlichen Bestimmungsweise, und zwar wuchs dasselbe

Fig. 32.




von 82,020 ccm
auf 82,205 „ .

Eine weit geringere Aenderung des Volumens zeigte sich jedoch, wenn nach Einsenkung des Apparatchens, sammt dem vulkanisirten Kautschuk, in das destillirte Wasser die Luft ausgepumpt wurde.

Auch hier ergab sich bei der Zusammendrückung von 58,8 mm auf 49,4 mm Höhe eine Volumszunahme, indem das Volumen von **81,980** ccm auf **82,017** stieg. In diesem Falle beträgt die Volumsänderung nur $^1/_5$ jener des früheren Versuches, bei welchem die Luft nicht entfernt war, und nur $^5/_{10000}$ des ganzen Volumens. Diese kleinen Differenzen können innerhalb der Beobachtungsfehler liegen und dies um so mehr, als die Volumsveränderung des Kautschuks pr. 1° C. von mir nicht bestimmt wurde, jene des Apparatchens aber erst später als entsprechend 7 Milligramm pr. 1° C. ermittelt wurde.

Die obigen Versuche zeigen nur, dass die Volumsveränderungen so klein sind, dass sie innerhalb der Beobachtungsfehler schon ziemlich genauer Versuche fallen können.

## Zugversuche mit einem Bande rothen Patentgummis.

Auch dieses Material ist nicht unveränderlich genug. Das Gewicht des Bandes beim Bezug betrug 12,087 g, aus dem Wasser genommen und an der Luft getrocknet 12,220 g, im Exsiccator getrocknet 12,060 g. Bei allen folgenden Versuchen wurde nach dem Einsenken des mit dem Bande versehenen Apparates evacuirt.

Das Volumen des Bandes, 151 mm lang, betrug im Wasser bei

20° C. oder hierauf bezogen . . . . . 11,422 ccm
Das Volumen d. Bandes auf 174 mm gedehnt, betrug i. Wasser v. 20° C. 11,423 „
„ „ „ „ „ 240 „ „ „ „ „ „ „ „ 11,427 „
„ „ „ „ „ 350 „ „ „ „ „ „ „ „ 11,432 „

Es liegen also auch hier (gleichfalls stets evacuirt) die Volumsänderungen fast innerhalb der Beobachtungsfehler und betragen nicht über $^8/_{10000}$ des ursprünglichen Volumens.

Das Auspumpen der Luft ist zu genauen Resultaten erforderlich, ohne selbes reichen die Aenderungen bis in die erste Decimalstelle, ohne dass wahrnehmbare Luftblasen am Apparat oder Object sich gezeigt hätten.

Diese Versuche lassen jedenfalls erkennen, dass bei jenen auffälligen Volumsverminderungen, welche die Praxis hin und wieder bei nicht besonders grossen Pressungen zeigt, eigentlich nichts anderes stattfindet, als ein Ausfliessen oder ein Zusammendrücken der Hohlräume.

**Der Einfluss der Geschwindigkeit. Die Beziehung von Druck und Stoss.**

Das Gesetz der proportionalen Widerstände setzt die Formänderung der geometrisch ähnlichen Körper gleichen Materiales mit annähernd gleichen Geschwindigkeiten voraus; findet die Formänderung in einem Falle durch ruhigen Druck, im andern durch Stoss oder Schlag statt, so gilt die Proportion

$$A : A_1 = G : G_1$$

nicht mehr. Dies führt zur Frage: Welchen Einfluss hat die Geschwindigkeit bezw. die Zeit?

Pressen wir einen Bleicylinder durch ruhigen Druck in der Achsenrichtung, so wird man finden, dass bei einem specifischen Drucke von z. B. 500 kg die Formänderung so langsam vor sich geht, dass man mehrere Tage beobachten kann und stets bei derselben Belastung ein weiteres Fortschreiten der Formveränderung finden wird; dieses Material kommt nicht zur Ruhe. Will man rascher arbeiten, so muss man grössere Pressungen geben; in welchem Verhältnisse zur Zeit bezw. zur Geschwindigkeit dieselben bei diesem Materiale stehen, ist eine noch offene Frage.

Derselbe Versuch mit Kupfer, Eisen, Stahl, mit diesen Materialien angepassten specifischen Drucken von z. B. 10000, 18000, 30000 kg ausgeführt, liefert in mehreren Minuten eine bestimmte Formänderung; ein merkliches Nachsinken unter der Pressung findet später nicht statt.

Bei Zerreissversuchen mit Flussstahl, Flusseisen u. dgl. stellt sich bei sehr langsamem Vorgange eine etwas höhere Dehnung und bedeutendere Contraction ein, so dass bei Angabe dieser Werthe die Versuchszeit einen nicht zu übersehenden Factor bildet. Bei spröden Materialien, z. B. Gusseisen, ist dieser Einfluss verschwindend.

Die Aufstellung eines Gesetzes für die Abhängigkeit dieser Formänderungen von der Zeit fand meines Wissens nicht statt, und würde zunächst wohl nur für jedes einzelne, bestimmte Material zu erzielen sein; denn aus diesen wenigen Beispielen geht schon hervor, dass sich die verschiedenen Materialien bei den gleichartigen Formänderungen in Bezug auf den Einfluss der zur Formänderung gebrauchten Zeit (bezw. Geschwindigkeit) verschieden verhalten.

Dieses verschiedene Verhalten der einzelnen Materialien, welches dadurch noch mannigfacher wird, dass dasselbe Material in verschiedenen Spannungszuständen (gepresst, ausgeglüht etc.) noch weitere Abweichungen im Verhalten zeigt, erschwert die Bestimmung des Einflusses der Versuchszeit wesentlich. Im Nachfolgenden ist daher nicht die Lösung

dieser schwierigen Frage gegeben, sondern nur ein Beitrag, welcher aber immerhin erkennen lässt, dass bei manchen Materialien nur bedeutende Unterschiede in der Deformationszeit bezw. Geschwindigkeit zu wesentlichen Differenzen der zur gleichen Formveränderung aufgewendeten Arbeit führen.

Es bestätigt die Richtigkeit des Gesagten zunächst die nebenstehende Tabelle, welche die Zusammenstellung sehr sorgfältig durchgeführter Schlagversuche enthält.

Die beiden Cylinder $C_1$ und $C_2$ aus Stehbolzenstangenkupfer hergestellt, aus welchem ausgezeichneten Materiale auch $C_3$ bestand, sind als congruent zu betrachten, weil ihre Abmessungen eine völlige Uebereinstimmung zeigten und die Gewichte nur um 22 mg (0,1 Proc.) differirten. Ihre innere Gleichartigkeit wurde auch dadurch erwiesen, dass sich beide ganz übereinstimmend bei gleicher Inanspruchnahme (Schlag von 1 m Höhe durch 6,7 kg Gewicht des Fallklotzes) deformirten.

Mit diesen beiden Versuchsstücken wurden nun vergleichende Versuche in der Weise vorgenommen, dass das eine vier Schläge aus 700 mm Höhe mit 6,7 kg gleich 4,69 mkg per Schlag erhielt, während dem zweiten Versuchsstücke vier Schläge aus 1372 mm Höhe mit 3,4 kg gleich 4,66 mkg per Schlag gegeben wurden. Diese beiden Schlagarbeiten sind als gleich zu bezeichnen, indem die geringe Differenz innerhalb der Fehler liegt, welche der Bestimmung des activen Gewichtes der Fallgewichte anhaften, d. h. innerhalb der Fehler, welche durch Reibungswiderstände u. dgl. bedingt sind. Die gleichen Arbeitsgrössen $GH$ haben die gleichen Formveränderungen hervorgerufen, obwohl die Fallhöhe des leichteren Schlagklotzes fast die doppelte Höhe hatte, demnach die Schlaggeschwindigkeiten im Verhältnisse von 1 : 1,4 standen.

Wir sehen ferner den nahezu geometrisch ähnlichen Kupfercylinder $C_3$ in solcher Weise deformirt, dass die auf ihn angewandten Arbeitsgrössen zu jenen, durch welche $C_1$ seine Formänderungen erlitt, sich wie die Gewichte der beiden Cylinder verhalten. Suchen wir die Endresultate, welche der Versuch mit $h = 9{,}9$ mm und $d = 24{,}9$ mm gibt, durch Rechnung aus den Daten über den mit $C_1$ angestellten Versuch zu finden, so wird

$$h = 8{,}05 \times \frac{18{,}2}{15} = 9{,}7 \text{ mm und } d = \frac{21{,}3 \times 17{,}95}{15{,}2} = 25{,}15$$

erhalten; der Fehler beträgt mithin 2 Proc. bei $h$ und etwas über 1 Proc. bei $d$, was bei Anwendung einer so grossen Zahl von Schlägen und bedeutenden Deformationen gewiss nicht von Belang ist, um so weniger, als die Fehler in der geometrischen Aehnlichkeit der Versuchsstücke ca. 1 Proc. betragen. Kleine Fehler gegen die geometrische Aehnlichkeit sind übrigens von geringer Bedeutung, wie dies die in Fig. 1, Taf. II, dargestellten Druckversuche mit Cylindern gleichen Materiales und gleichen Volumens, aber verschiedener Abmessungen darthun.

## Schlagversuche mit Kupfercylindern

zur Ermittlung des Einflusses der Fallhöhe bei gleicher Schlagarbeit und des Einflusses wiederholter Schläge bei gleicher Gesammtarbeit.

$C_1$ $h = 15{,}0$ mm, $d = 15{,}2$ mm, $g = 24{,}212$ g

$C_2$ $h = 15{,}0$ mm, $d = 15{,}2$ mm, $g = 24{,}190$ g

$C_3$ $h = 18{,}2$ mm, $d = 17{,}95$ mm, $g = 40{,}615$ g

Auf $C_1$ und $C_2$ je ein Schlag aus 1 m Höhe mit 6,7 kg activem Gewichte.

Ein Schlag $H = 1{,}671$ m, $G = 6{,}7$ kg $A_3 = H.G$ bestimmt aus $A_1 : A_3 = 24{,}212 : 40{,}615$

$h' = 13{,}4$ mm, $d' = 16{,}2$ mm

$h' = 13{,}4$ mm, $d' = 16{,}2$ mm

$h' = 16{,}5$ mm, $d' = 18{,}95$ mm

Hiernach sind $C_1$ und $C_2$ vollkommen übereinstimmend.

$C_3$ verhält sich mithin dem Gesetz entsprechend.

Fallhöhe $= 700$ mm, Actives Gewicht $= 6{,}7$ kg $= A_1 = A_2$ $H = 1372$ mm, $G = 3{,}4$ kg

$H = 1170$ mm, $G = 6{,}7$ kg.

| Schlag | Höhe | Durchmesser | Höhe | Durchmesser | Schlag | Höhe | Durchmesser |
|---|---|---|---|---|---|---|---|
| 1 | 12,9 | 16,6 | 12,9 | 16,6 | 1 | 15,8 | 19,4 |
| 2 | 12,4 | 16,9 | 12,5 | 16,9 | 2 | 15,3 | 19,74 |
| 3 | 12,1 | 17,2 | 12,15 | 17,2 | 3 | 14,8 | 20,10 |
| 4 | 11,74 | 17,5 | 11,76 | 17,5 | 4 | 14,4 | 20,42 |
| Ebenso fortgefahren | | | Schlag | Fallhöhe 1,4 m Gewicht 6,7 kg | | | |
| 5 : 1′ | 11,5 | 17,8 | | | 5 | 14,0 | 20,70 |
| 6 : 2′ | 11,16 | 18,0 | 1 | 11,0 18,1 | 6 | 13,64 | 21,05 |
| 7 : 3′ | 10,90 | 18,2 | | | 7 | 13,3 | 21,35 |
| 8 : 4′ | 10,67 | 18,4 | | | 8 | 13,0 | 21,55 |
| 9 : 5′ | 10,4 | 18,6 | 2 | 10,5 18,6 | 9 | 12,75 | 21,8 |
| 10 : 6′ | 10,2 | 18,8 | | | 10 | 12,45 | 22,1 |
| 11 : 7′ | 10,0 | 19,05 | 3 | 9,9 19,15 | 11 | 12,20 | 22,34 |
| 12 : 8′ | 9,8 | 19,30 | | | 12 | 12,0 | 22,6 |
| 13 : 9′ | 9,6 | 19,50 | | | 13 | 11,7 | 22,7 |
| 14 : 10′ | 9,4 | 19,6 | 4 | 9,5 19,6 | 14 | 11,55 | 22,95 |
| 15 : 11′ | 9,25 | 19,8 | | | | | |
| 16 : 12′ | 9,10 | 20,0 | 5 | 9,1 20,1 | | | |
| 17 : 13′ | 9,00 | 20,2 | | | | | |
| 18 : 14′ | 8,85 | 20,4 | | | | | |
| 19 : 15′ | 8,7 | 20,5 | 6 | 8,7 20,47 | | | |
| 20 : 16′ | 8,56 | 20,65 | | | | | |
| 21 : 17′ | 8,4 | 20,9 | 7 | 8,35 20,9 | | | |
| 22 : 18′ | 8,3 | 21,0 | | | | | |
| 23 : 19′ | 8,17 | 21,15 | | | | | |
| 24 : 20′ | 8,05 | 21,3 | 8 | 8,00 21,35 | 24 | nicht gemessen | nicht gemessen |

Es erwies sich somit auch hier der Einfluss der Differenz der Fallhöhen (700 mm, bezw. 1170 mm) bei 24 Schlägen als verschwindend, da die Arbeitsgrössen $GH$ in jenem Verhältnisse standen, welche dem Gesetze der proportionalen Widerstände entsprachen.

Die nachstehenden Proben sind zu dem Zwecke durchgeführt worden, den Einfluss der Fallhöhe, bezw. der Schlag-Geschwindigkeit zu ermitteln.

a) Zwei Bleicylinder, Höhe $h = 15{,}1$, Durchmesser $d = 15{,}13$ wurden deformirt u. zw.:

| Cylinder 1. | Cylinder 2. |
|---|---|
| Fallhöhe 3,07 m | Fallhöhe 0,261 m |
| Gewicht des Schlagklotzes 0,576 g | Gewicht des Schlagklotzes 6,75 kg |
| Schlagarbeit 1,768 mkg | Schlagarbeit 1,768 mkg. |

Die Schlaghöhe wurde von der oberen Endfläche der Werkstücke aus gemessen, und sind nachstehend deren Abmessungen gegeben. Es betrug nach dem

| | |
|---|---|
| 1. Schlag. | 1. Schlag. |
| $h' = 12{,}2$ mm, $d' = 17{,}3$ | $h' = 12{,}1$, $d' = 17{,}2$ |
| 2. Schlag. | 2. Schlag. |
| $h'' = 9{,}81$, $d'' = 19{,}5$ | $h'' = 9{,}9$, $d'' = 19{,}0$ |
| 3. Schlag. | 3. Schlag. |
| $h''' = 8{,}0$, $d''' = 21{,}6$ | $h''' = 8{,}1$, $d''' = 21{,}2$. |

Die Resultate sind nahezu übereinstimmend, und es muss bemerkt werden, dass die Differenzen in den Durchmessern vollkommen innerhalb der Unterschiede der Messung, bedingt durch die runzelige Oberfläche der deformirten Stücke, liegen. Die Endgeschwindigkeiten stehen nahezu im Verhältnisse von 2 : 8 oder **1 : 4** und doch ist hier bei gleichen $GH$ auch die gleiche Formänderung erhalten worden.

Wegen der runzeligen Umflächen sind bei dem nächsten Versuche nur die Höhenabnahmen gemessen.

b) Zwei Bleicylinder von $h = d = 18{,}0$ mm wurden in der gleichen Weise wie die kleineren Cylinder des vorigen Versuches deformirt.

| | I. Cylinder. | II. Cylinder. |
|---|---|---|
| | $A = 0{,}576 \times 3{,}07 = 1{,}768$ mkg | $A = 6{,}75 \times 0{,}261 = 1{,}768$ mkg |
| 1. Schlag | $h' = 15{,}3$ mm | 15,3 |
| 2. „ | $h'' = 13{,}4$ | 13,25 |
| 3. „ | $h''' = 11{,}75$ | 11,56 |
| 4. „ | $h'''' = 10{,}5$ | 10,0 |

c) Mit vier Bleicylindern nahezu gleicher Grösse wurden Schlagproben in der Weise ausgeführt, dass die beiden ersten Schläge mit

dem schweren, die beiden letzten Schläge mit dem leichten Schlagklotze erhielten. Die Abmessungen und Versuchsdaten sind folgende:

| | | | | |
|---|---|---|---|---|
| Bleicylinder | $C_1$ $\begin{cases} h = 10{,}2\,\text{mm} \\ d = 10{,}1 \end{cases}$ | $C_2$ $\begin{cases} h = 10{,}12 \\ d = 10{,}14 \end{cases}$ | $C_3$ $\begin{cases} h = 10{,}15 \\ d = 10{,}05 \end{cases}$ | $C_4$ $\begin{cases} h = 10{,}13 \\ d = 10{,}03 \end{cases}$ |
| Schlaggewicht | $G = 6{,}7$ kg | $G = 6{,}7$ kg | $G = 0{,}576$ kg | $G = 0{,}576$ kg |
| Fallhöhe | $H = 0{,}264$ m | $H = 0{,}264$ | $H = 3{,}07$ mg | $H = 3{,}07$ mg |
| Schlagarbeit | $A = 1{,}768$ mkg | $A = 1{,}768$ mkg | $A = 1{,}768$ mkg | $A = 1{,}768$ mkg |
| nach dem | | | | |
| 1. Schlag | $h' = 6{,}05$ | $h' = 5{,}63$ | $h' = 5{,}9$ | $h' = 5{,}6$ |
| 2. „ | $h'' = 3{,}96$ | $h'' = 3{,}5$ | $h'' = 3{,}8$ | $h'' = 3{,}5$ |

Das Ergebniss auch dieser Versuche ist dahin zusammenzufassen, dass die Deformation bei Anwendung von Schlägen abhängig ist von der Arbeit des Schlages, hingegen innerhalb ziemlich weiter Grenzen unabhängig von der Geschwindigkeit des Schlages.

In Bezug auf die Bestimmung der Schlagarbeit ist jedoch hervorzuheben, dass das Schlaggewicht abzüglich der Reibung ermittelt werden muss; dass die Schlaghöhe von der oberen Endfläche des Werkstückes zu messen und dafür Sorge zu tragen ist, dass der Schlagklotz ohne seitliche Erschütterungen fällt, zu welchem Zwecke die Aufhängung desselben an einem Faden zu erfolgen hat, welcher abzubrennen ist. (S. Anhang bei Schlagwerke.)

Aus der Tabelle Seite 89 ist ferner ersichtlich, dass die letzten 8 Schläge, auf $C_2$ gegeben, bereits jene Deformation erzielten, welche 20 Schläge von halber Intensität, also zusammen von 1,25mal grösserer lebendiger Kraft, auf den congruenten Cylinder $C_1$ hervorbrachten.

Man ersieht hieraus, dass die Leistung vieler schwacher Schläge wesentlich geringer ist, als jene weniger, wuchtiger Schläge von gleicher Gesammtarbeit.

Es ist dies auch sehr begreiflich, denn bei jedem Schlage wird ein bestimmter Theil der lebendigen Kraft (Arbeit) zur Ueberwindung des elastischen Widerstandes verbraucht, und erst der Rest der Schlagarbeit bewirkt ein Fliessen, respective eine bleibende Formveränderung des Probestückes. Dieser Theil des Versuches ist in vollster Uebereinstimmung mit Schlagproben, welche seiner Zeit General Uchatius durchführte und welche hier folgen mögen, da sie weniger bekannt sein dürften.*)

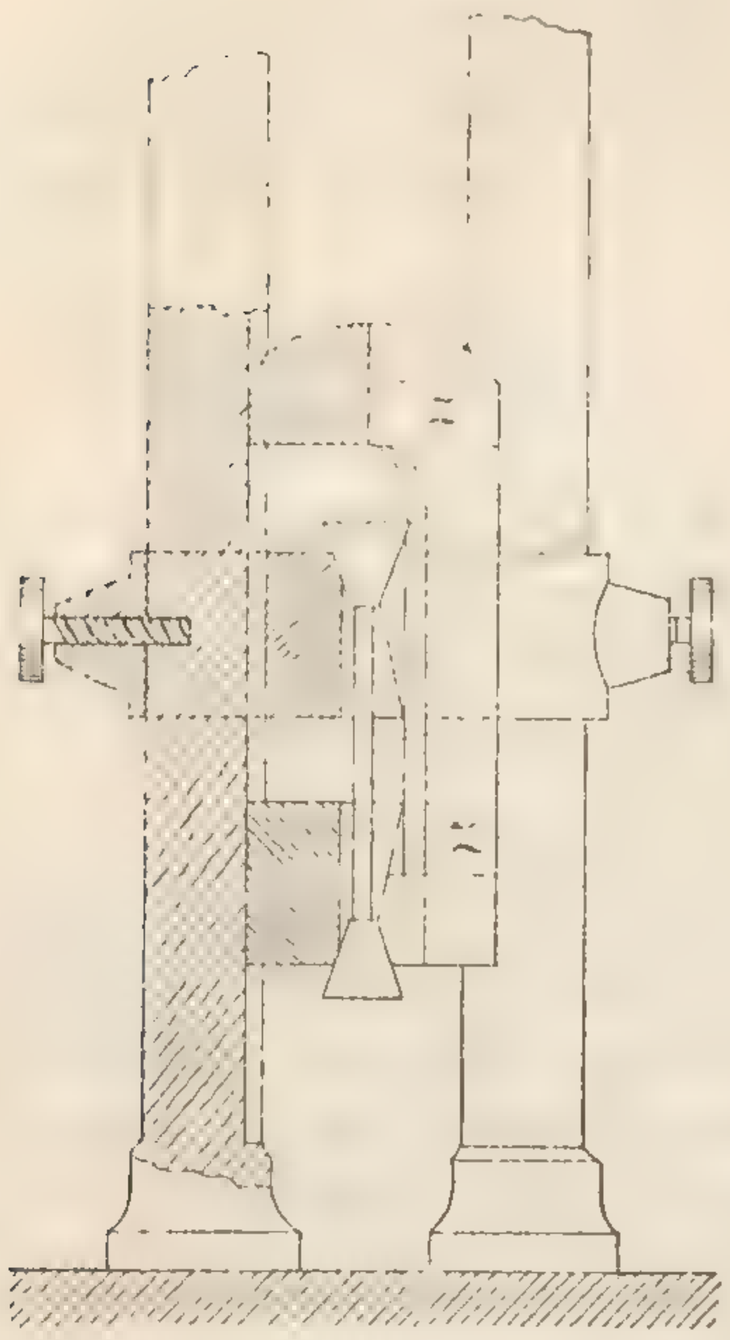
Bei Aufsuchung der „absoluten Festigkeit für Stoss“ von Geschützgusseisen benutzte Uchatius einen Apparat, bei welchem der Stoss des Fallgewichtes durch Vermittelung einer eigenthümlich construirten Zange (Einspannvorrichtung) (*z* Fig. 33) auf den unteren Kopf des Probe-

---

*) Vortrag über Stahlbronze, gehalten am 10. April 1874 im k. k. Artillerie-Arsenal von Franz R. v. Uchatius. Wien 1874. Selbstverlag.

stäbchens übertragen wurde. Der Stoss wirkte demnach der Länge des Probestäbchens nach ausdehnend auf dasselbe ein. (Vergl. Fig. 33.)

Fig. 33.



Um die Elasticitätsgrenze für Stoss zu finden, wurde die Fallhöhe des Gewichtes allmälig vergrössert, bis eine bleibende Verlängerung des Probestäbchens eintrat. Die hierbei angewandte Schlagarbeit $GH$ war das Maass der Elasticitätsgrenze für den Stoss. Uchatius sagt: „Die absolute Festigkeit für den Stoss, d. h. diejenige Stosskraft in Meterkilogrammen, bei welcher bei einmaliger Anwendung das Probestäbchen von 1 qcm Querschnitt brach, konnte nur bei Verwendung vieler, ganz gleicher Probestäbchen gefunden werden, weil jeder über die Elasticitätsgrenze hinaus das Stäbchen beanspruchende Stoss dasselbe schwächt.“ Uchatius arbeitete mit einem Fallgewicht von 1,15 kg, die Probelänge der Stäbchen betrug 75 mm, ihr Querschnitt 0,5 qcm. Hierbei wurde für Geschützgusseisen gefunden:

Die Stäbchen brachen:

| | | | | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| beim 1. | Stosse | bei | $8 \times 0{,}09$ | m | Fallhöhe, | Brucharbeit | $= 8 \,.\, 0{,}1035$ | mkg |
| 2. | „ | „ | $7 \times 0{,}09$ | m | „ | „ | $= 14 \,.\, 0{,}1035$ | „ |
| 4. | „ | „ | $6 \times 0{,}09$ | m | „ | „ | $= 24 \,.\, 0{,}1035$ | „ |
| 8. | „ | „ | $5 \times 0{,}09$ | m | „ | „ | $= 40 \,.\, 0{,}1035$ | „ |
| 14. | „ | „ | $4 \times 0{,}09$ | m | „ | „ | $= 56 \,.\, 0{,}1035$ | „ |
| 37. | „ | „ | $3 \times 0{,}09$ | m | „ | „ | $= 111 \,.\, 0{,}1035$ | „ |
| 352. | „ | „ | $2 \times 0{,}09$ | m | „ | „ | $= 704 \,.\, 0{,}1035$ | „ |
| 2052. | „ | „ | $1 \times 0{,}09$ | m | „ | „ | $= 2052 \,.\, 0{,}1035$ | „ |

Bei der Fallhöhe von $^1/_3 \,.\, 0{,}09$ m $=$ 3 cm wurde das Stäbchen nur innerhalb der Elasticitätsgrenze beansprucht.

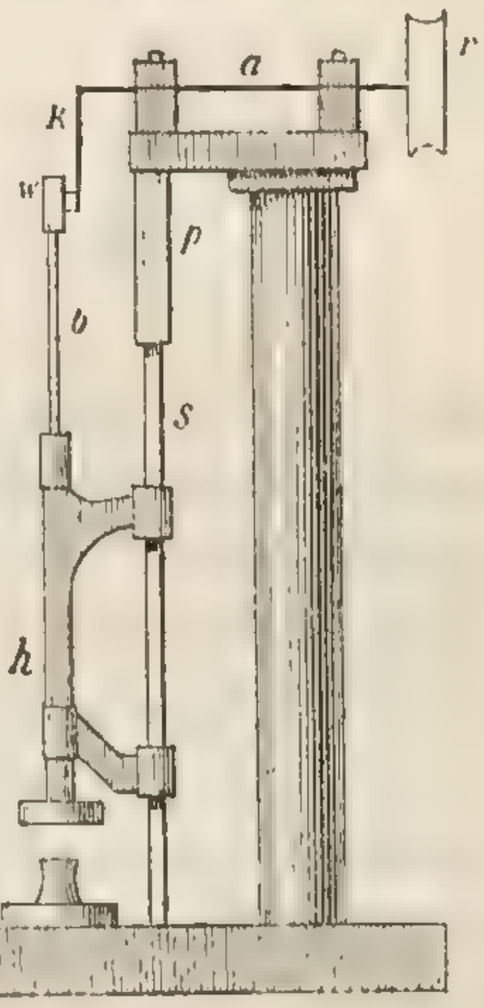
Diese Versuche zeigen unwiderleglich, dass die Gesammtarbeit vieler schwacher Schläge zur Erzielung eines bestimmten Effectes weitaus grösser ist, als die eines einzigen, wuchtigen Schlages. Vielleicht dürfte man aber aus denselben noch dies ableiten können, dass die schwachen Schläge, selbst wenn sie in ihrer Wirkung die Elasticitätsgrenze ziemlich überschreiten, das Probeobject doch nicht bedeutend schwächen. Hat man 2052 Schläge der Intensität 0,1035 mkg zum Zerreissen nöthig, so mag ein solcher Schlag eine Schwächung von $^1/_{2052}$ herbeiführen u. s. w. Addiren wir die Brüche

$^1/_4$, $^1/_8$, $^1/_{14}$, $^1/_{37}$, $^1/_{352}$, $^1/_{2052}$, so erhalten wir 0,476 d. h. es ist annäherungsweise 0,476 des Zerreissungswiderstandes überwunden, man bedarf dann noch immer mindestens eines Schlages aus $7 \times 0{,}09$ m Höhe, um den Bruch zu erzielen.

Man könnte also auf das Object successive höhere und höhere Schläge führen und würde schliesslich für den Bruch eine Schlaghöhe finden, welche nur um weniges von jener verschieden ist, bei welcher ein einziger Schlag den Bruch bewirkt. Die Versuche mit Stein-, Masse-, Glas- und Gusseisenkugeln (Seite 5 u. 56) lehrten mich dasselbe. Es war hierdurch möglich, mit verhältnissmässig wenigen Versuchsstücken den Bruchfactor mit aller Bestimmtheit zu ermitteln.

Indem durch das Vorstehende erwiesen ist, dass zahlreiche schwache Schläge in ihrer Summe zur Erzielung eines in der Hauptsache gleichen Resultates eine weit grössere Arbeit verbrauchen, als ein starker Schlag, so ist auch ersichtlich, dass die Beziehung zwischen dem Arbeitsaufwande bei ruhigem Druck und jenem bei Anwendung von Schlägen nur in der Weise gesucht werden sollte, dass man nur einen Schlag von hinreichender Arbeitsgrösse, um die verlangte Wirkung hervorzubringen, mit der zur gleichen Wirkung erforderlichen Druckarbeit vergleicht. Es muss übrigens hier bemerkt werden, dass äusserst zahlreiche und sehr schwache Stösse zu secundären, ganz abweichenden Formänderungen führen können. Bei allen bisher gegebenen Beispielen waren die Stösse doch immer von einer solchen Intensität, dass ihre Einwirkung der Gattung nach gleich, nur dem Grade nach verschieden war; dies ist aber bei den sogleich zu beschreibenden Versuchen nicht mehr der Fall. Die beistehende Fig. 34 stellt den kleinen, zu diesen Versuchen verwendeten Apparat dar. Die Schnurrolle $r$ machte 300—600 Touren. Durch die Welle $a$, die Kurbel $k$, ein auf der Kurbelwarze drehbares Stück $w$, das Kautschukband $b$, wurde die Bewegung dem kleinen Hammer $h$, welcher an zwei, in der Figur sich deckenden, verticalen Säulen $s$ geführt wurde, übertragen. Auf die Säulchen $s$ waren Kautschukröhren $p$ als Puffer aufgeschoben, um den Schlag zu beschleunigen. Der Kurbelradius liess sich durch Verstellung der Warze im Schlitze der Kurbel abändern. Als Amboss wurden Stahlscheiben $m$ von verschiedener Höhe benutzt, auf welche das zu bearbeitende Werkstück gestellt und durch einen, in der Figur nicht gezeichneten, dasselbe mit Spielraum umgebenden Ring vor dem Herabfallen vom Amboss bewahrt wurde. Ein dieser Einwirkung ausgesetzter

Fig. 34.



Bleicylinder von der Höhe = 17,3 mm und dem Durchmesser = 12,2 mm wurde nach ca. 30 Minuten in die durch Fig. 35 dargestellte Form gebracht (ein Cylinder von 10 mm Höhe und 10 mm Durchmesser) und nahm nach mehr als einstündiger Bearbeitung bei fortgesetzten Schlägen von nur wenigen Millimetern Hub die Gestalt Fig. 36 an.

Fig. 35.

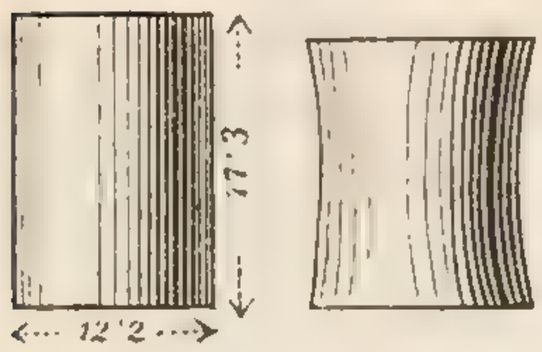



Fig. 36.

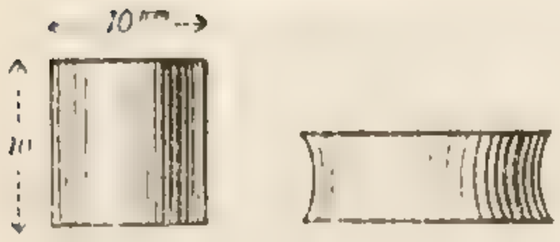



Fig. 37.

Fig. 38.

War das Bleicylinderchen zwischen zwei parallelen Weissblechplättchen gelöthet, so nahm es nach ca. 30 Minuten die Gestalt Fig. 37 an, und befand es sich an der unteren Fläche eines Plättchens Weissblech, so erhielt man in etwa 10 Minuten die Form Fig. 38.

Lange blieb die Erklärung dieser eigenthümlichen Erscheinungen aus, doch glaube ich, dass die folgende richtig ist. Das Cylinderchen bleibt nicht ruhig auf der Unterlage stehen, es vibrirt; es dürfte theils durch Adhäsion, theils durch Luftdruck von der Unterfläche des kleinen Schlagklotzes ein wenig mit in die Höhe genommen werden, doch fällt es früher, als der kleine Hammer niedergeht, welcher das Werkstück im Falle einholt und beschleunigt, so dass es einmal einen Stoss von oben, dann von unten u. s. f. erhält. Dadurch wäre die eigenthümliche beiderseitige Stauchung erklärt und auch begreiflich, dass dieselbe Deformationsform sich bei einem kleinen Kupfercylinderchen von 5,74 mm Höhe bei 5,8 mm Durchmesser mit demselben Apparat nicht erzielen liess, weil die Masse des Stückes gegenüber seinem Widerstande zu geringfügig war.

Die Stauchung tritt einseitig stets ein, wenn ein in der Hand gehaltener oder aufgehängter Cylinder plastischen Materials gegen eine seiner Endflächen in der Achsenrichtung Stössen ausgesetzt wird; desgleichen, wenn ein cylindrischer Körper dieser Art gegen eine feste Wand geschossen oder geschleudert wird, oder wenn er in der Achsenrichtung auf eine feste Unterlage auffällt. Hiervon überzeugt man sich am leichtesten, wenn man einen Cylinder aus weicher Porzellanmasse auf einen geeignet geformten Fallklotz stellt und letzteren auf den Amboss fallen lässt, wobei die Porzellanmasse sich staucht. Ist dieselbe entsprechend horizontal und vertical geschichtet, so erhält man die in Fig. 39 dargestellte Schichtenverwerfung. Fig. 39 *a* ist bei geringerer Fallhöhe (5 m), Fig. 39 *b* bei grösserer Fallhöhe (8 m) erhalten.

Interessant ist auch, und mag hier Erwähnung finden, dass manche Körper sich gegen Stösse elastisch verhalten, während sie bei ruhigem Drucke die feinsten Eindrücke aufnehmen. So ist es bekannt, dass

Guttapercha in Wasser von 60 bis 70° plastisch wird und zu den feinsten Abdrücken verwendet werden kann. Weniger bekannt dürfte es sein, dass die weiche Guttapercha gegen Stösse sich elastisch zeigt und sowohl Hammerschläge als auch das Werfen gegen eine feste Wand verträgt, ohne Formänderungen zu erleiden, während sie doch gegen ruhigen Druck empfänglich und der feinsten Eindrücke fähig ist.*)

Fig. 39a.

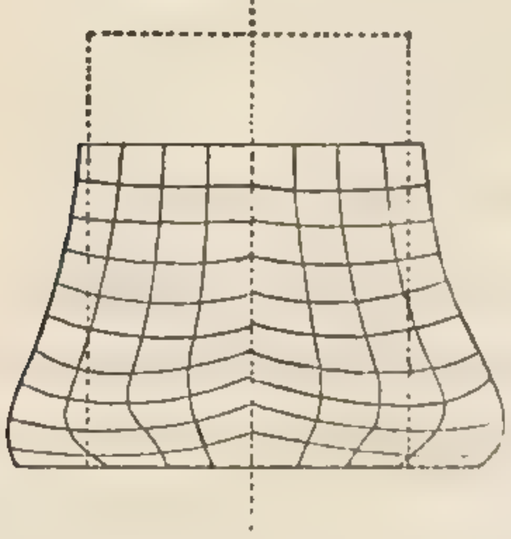
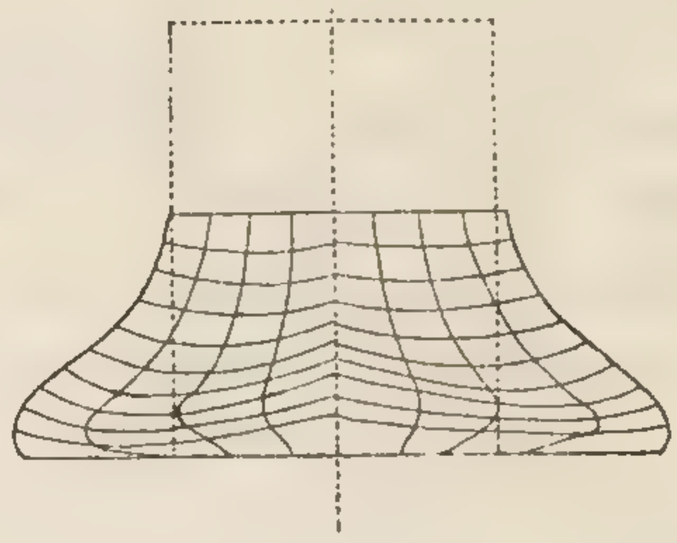


Fig. 39b.



Dieses eigenthümliche Verhalten, welches in weniger auffälliger Weise auch noch anderen plastischen Massen zukommt, besonders dem gekneteten ziemlich frischen Brode, rührt von eingeschlossener Luft her. Man kann sich hiervon leicht durch folgende einfache Versuche überzeugen. Man mache sich zwei gleich schwere Kugeln plastischer Guttapercha durch einfachste Bearbeitung der in 70° C. warmem Wasser erweichten Masse zwischen den genässten Flächen der Hände, lege eine derselben auf ein Kartenblatt unter die Glocke einer Luftpumpe und evacuire möglichst rasch; die zweite Kugel hebe man des Vergleiches wegen auf. Beide Kugeln werden infolge ihres Gewichtes die Form eines runden Kuchens annehmen, aber jene unter die Luftpumpe gebrachte wird sich bedeutend aufblähen und eine runzelige Oberfläche erhalten. Die Volumenvergrösserung beträgt häufig mehr als das doppelte des ursprünglichen Volumens. Lässt man das aufgeblähte Stück unter dem Recipienten der Luftpumpe erhärten und zerschlägt dasselbe mit einem Stemmeisen, so erscheint der Querschnitt luckig, ähnlich der Krume von Brod, während der Bruch des zweiten Stückes nur kleine Hohlräume zeigt. Sehr dichte Guttapercha bläht sich zwar unter der Luftpumpe nicht merklich auf, aber unter Mineralöl gebracht und evacuirt, tritt reichliche und lang dauernde Luftentwicklung aus der Guttapercha ein. Lässt man hierauf unter den Recipienten Luft eintreten und untersucht nachher die Guttapercha, so hat sie die Eigenschaft, erkaltet zu erhärten, verloren und gleicht einem zähen, gefetteten Leder. Reichliche Luftentwicklung wurde auch aus Modellirthon, Glaserkitt und geknetetem Brode unter Oel im Vacuum beobachtet.

*) Zuerst veröffentlicht in Dingler's polytechnischem Journale 1881. Bd. 240, S. 363.

Obige Erscheinung der Volumenvergrösserung zeigt auch manche Guttapercha, welche im Luftbade erweicht wurde; nur hat hierbei die Zeit der Erwärmung viel länger zu dauern, da die erwärmte Luft des Luftbades nur sehr langsam die hinreichende Wärme abgibt.

Bei manchen Körpern spielt die eingeschlossene Luft beim mechanischen Verhalten eine Rolle; so erscheint z. B. auch Modellirthon etwas elastisch, d. h. er lässt sich im Presscylinder durch den Kolben etwas zusammendrücken, und hört die Pressung auf, so nimmt er sein früheres Volumen wieder an. Ein möglichst dichtes Stück Modellirthon, unter die Luftpumpe gebracht, bekommt zahlreiche Haarrisse, welche sich alsobald schliessen, wenn das Vacuum sich genügend verringert.

Das soeben behandelte Beispiel zeigt so recht auffällig, dass sich verschiedene Materialien in ihrem Widerstande gegen Stösse und ruhigen Druck principiell verschieden verhalten, dass es daher nicht möglich ist, eine allgemein gültige Beziehung zwischen der zu einer bestimmten Formveränderung erforderlichen mechanischen Arbeit bei Anwendung von ruhigem Druck einerseits und bei Anwendung von Stössen andererseits zu finden. Es kann sich vielmehr diese Beziehung, wenigstens zunächst, nur mit Rücksicht auf ein bestimmtes Material und eine bestimmte Beanspruchung desselben finden lassen und seien im Folgenden mehrere specielle Fälle behandelt.

Vergleichen wir die Arbeitsgrösse, welche erforderlich war, um einen Kupfercylinder von $h = d = 18{,}0$ mm auf die Höhe von 9,9 mm zusammenzudrücken, mit jener Arbeitsgrösse, welche ein gleicher Cylinder bei den auf S. 89 mitgetheilten Schlagversuchen dem Anscheine nach zu dieser Formänderung erheischte, so finden wir die Druckarbeit aus dem Diagramme *A* Fig. 1, Taf. I zu 85 mkg, hingegen die Schlagarbeit nach den S. 89 gegebenen Zahlen zu 166 mkg. Demnach war dem Anscheine nach eine zwei Mal grössere Arbeit zur Formänderung mittels der Schläge erforderlich. Die Worte „dem Anscheine nach“ sollen andeuten, dass in dem *GH* des Schlagwerkes wohl die aufgewendete, nicht aber die an das Werkstück abgegebene Arbeit zu verstehen ist, weil von der aufgewendeten Arbeit ein unbekannter Antheil in den Amboss geht. Dieser Antheil wurde durch Versuche, welche mit einem ballistischen Schlagwerke durchgeführt wurden, zu bestimmen getrachtet; auf die diesbezüglichen Versuche kommen wir später zu reden. Zunächst aber sei es noch gestattet, in der vorstehenden Art den Vergleich zwischen Schlag und Druckarbeit an einigen Beispielen durchzuführen.

Auf S. 92 wurden die Schlagversuche mit Geschützgusseisen von Uchatius besprochen. Mit demselben Materiale durch den Genannten ausgeführte Zugversuche sind in ihren Resultaten in nebenstehender Tabelle wiedergegeben.

| Last in kg pro 1qcm Querschnitt. | Dehnung in 0,00001 der Länge | | Last in kg pro 1qcm Querschnitt. | Dehnung in 0,00001 der Länge | |
|---|---|---|---|---|---|
| | elastisch | bleibend | | elastisch | bleibend |
| 100 | 2 | 0 | 1300 | 84 | 14 |
| 200 | 10 | 0 | 1400 | 92 | 19 |
| 300 | 15 | 0 | 1500 | 101 | 24 |
| 400 | 22 | 0 | 1600 | 110 | 30 |
| 500 | 27 | 0 | 1700 | 120 | 35 |
| 600 | 33 | 0 | 1800 | 130 | 50 |
| 700 | 38 | 2 | 1900 | 142 | 65 |
| 800 | 47 | 4 | 2000 | 157 | 81 |
| 900 | 54 | 5 | 2100 | — | — |
| 1000 | 61 | 6 | 2200 | — | — |
| 1100 | 68 | 8 | 2300 | — | — |
| 1200 | 76 | 10 | 2420 | gerissen. | |

Construirt man sich nach diesen Angaben das Arbeitsdiagramm für den Bruch, so erhält man als den Arbeitsaufwand für das Zerreissen eines Stäbchens von 1 qcm Querschnitt nahe 0,2 mkg, mithin für den halben Querschnitt näherungsweise . . . . . 0,1 mkg.

Vergleichen wir diese Zahl mit dem Arbeitsaufwande 0,828 mkg für das Zerreissen durch einen Stoss, so stellt sich die Stossarbeit, allerdings beeinflusst durch das Zwischenstück, als **achtmal** grösser als die Druckarbeit dar.

Die Arbeit für die Dehnung bis zur Elasticitätsgrenze beträgt, bei $^1/_2$ qcm Querschnitt, etwa 0,003 mkg; es würde dies einem Schlage des Gewichtes von 1,15 kg von kaum 3 mm Fallhöhe entsprechen, während Uchatius fand, dass schon bei 30 mm Fallhöhe die Schläge dieses Gewichtes die Elasticitätsgrenze nicht überstiegen. Das Verhältniss ist auch hier jedenfalls dadurch beeinflusst, dass die Schläge durch Vermittlung eines Zwischenstückes *z* (Fig. 33, S. 92) auf das Werkstück übertragen werden, welches Zwischenstück zu seiner elastischen Deformation jedenfalls auch Arbeit braucht.

Hr. Robert Lane Haswell machte zwei comparative Versuche, eine und dieselbe Achse durch ruhigen Druck zu biegen und hierauf durch Schläge wieder gerade zu richten. Ist eine bleibende Durchbiegung nicht sehr bedeutend, so kann der Arbeitsaufwand, welcher für das Geraderichten erforderlich ist, gleich dem Arbeitsaufwand für die Biegung genommen werden; denn derselbe Stoss (Fallklotzgewicht mal Hubhöhe), welcher eine gewisse Biegung erzielte, richtet, in gehöriger Weise ausgeübt, das gebogene Stück auch wieder gerade. Dies vorausgeschickt, lassen Haswell's Versuche jenen Vergleich zu, welcher beabsichtigt ist.

Bei der angewendeten Hebelpresse betrug das auf das Hebelende reducirte Hebel- und Schalengewicht zusammen 241,25 kg; der kurze

Hebelarm hatte 210 mm, der lange 4845 mm, und war daher das Uebersetzungsverhältniss 23,07. Der Abstand der Auflagen betrug 1,5 m. Die Druckprobe ergab bei einer Schmiedeeisenachse von 132,75 mm Durchmesser nachstehende Resultate.

| Auflage auf der Wagschale. | Durchbiegung | | Anmerkung. |
|---|---|---|---|
| | elastisch | bleibend | |
| kg | mm | mm | |
| 250 | 2,7 | 0 | Die Auflagegewichte sind um obengenannte 241,25 kg zu vermehren und diese Summen je mit 23,07 zu multipliciren, um die in der Mitte der Achse ausgeübten Drucke zu finden. |
| 300 | 3,1 | 0 | |
| 350 | 3,46 | 0 | |
| 400 | 4,1 | 0,46 | |
| 425 | 4,6 | 0,75 | |
| 450 | 5,1 | 1,30 | |
| 475 | 6,6 | 2,60 | |
| 625 | — | 17,0 | |
| 685 | — | 24,0 | |

Construirt man diesen Daten entsprechend das Arbeitsdiagramm*), so liefert dasselbe für die bleibende Durchbiegung von 24 mm den Arbeitsaufwand von 125 mkg.

Dieselbe Achse wurde nun durch Schläge unter einem Fallwerk zurückgebogen, dessen Fallklotz 649,5 kg wog.

| Schlag | Fallhöhe | Durchbiegung |
|---|---|---|
| | m | mm |
| 1 | 0,600 | 12 |
| 2 | 0,700 | 5 |
| 3 | 0,332 | 3 |
| 4 | 0,332 | 2 |

Es beläuft sich der Gesammtarbeitsaufwand auf 1212,6 mkg. Bloss für das Zurückbiegen um 12 mm wurden 389,7 mkg aufgewendet, wofür man aus dem Arbeitsdiagramm 56 mkg findet. Es verhält sich demnach hier die Druck- zur Stossarbeit wie 56 : 389,7 oder nahe 1 : 7.

Die gesammte Druck- zur gesammten Schlagarbeit wie 125 mkg zu 1212 mkg oder nahe wie 1 : 10. Leider fehlen alle Angaben über die Construction des Schlagwerkes, sowie über die Art, wie der Schlagklotz ausgelassen wurde. (Vergl. S. 114.)

Einen zweiten Versuch machte Haswell mit einer Bessemerstahlachse von 129,5 mm Durchmesser. Dieselbe wurde auf der oberwähnten Hebelpresse auf 12,5 mm durchbogen.

*) Dasselbe wurde vom Referenten in Dingler's polytechnischem Journal 1875, Bd. 216, S. 377 u. ff. dargestellt.

Die Versuchsdaten sind folgende:

| Auflage auf der Wagschale. | Durchbiegung | | Auflage auf der Wagschale. | Durchbiegung | |
|---|---|---|---|---|---|
| | elastisch. | bleibend. | | elastisch. | bleibend. |
| kg | mm | mm | kg | mm | mm |
| 25 | 1,5 | — | 385 | 3,99 | — |
| 50 | 2,0 | — | 485 | 4,99 | — |
| 75 | 2,0 | — | 585 | 5,66 | 0,9 |
| 135 | 2,75 | — | 760 | 7,70 | 1,5 |
| 210 | 3,20 | — | 885 | 8,40 | 3,5 |
| 260 | 3,40 | — | 1105 | 9,30 | 9,3 |
| 285 | 3,50 | — | 1183,5 | 15,0 | 12,5 |

Das auf Grundlage dieser Daten construirte Arbeitsdiagramm erweist den Arbeitsaufwand zu etwa 229 mkg. Bei der Zurückbiegung derselben Achse, durch Schläge unter dem Fallwerke, wurden nachstehende Resultate erhalten:

| Schlag | Fallhöhe | Durchbiegung |
|---|---|---|
| | m | mm |
| 1 | 0,6 | 7,0 |
| 2 | 0,7 | 2,5 |
| 3 | 0,6 | 0 |

Dieser Arbeitsaufwand beträgt $649{,}5 \times 1{,}9 = 1234$ mkg.

Bei ruhigem Druck beträgt die Biegungsarbeit von 7 bis 12,5 mm 75 mkg, während der erste Schlag einer Arbeit von 389,7 mkg entspricht. In diesem Falle verhält sich die Druckarbeit zur Stossarbeit wie 1 : 5.

Bei vergleichenden Proben, welche nach dem Engineering*) vom Maschineninspectorate der indischen Staatsbahnen mit Bessemerstahlschienen vorgenommen wurden, stellte sich das Verhältniss von Druck- zu Schlagarbeit in einem Falle wie 1 : 10, in einem zweiten wie 1 : 12.

Wir legten eine parallelepipedische Fichtenholzleiste von den Querschnittsdimensionen 13,7 und 19 mm hochkantig auf 0,6 m entfernte Unterlagen. Durch ruhigen Druck bei einem Arbeitsaufwande (nach einem Diagramm bestimmt) von ca. 0,3 mkg erfolgte der Bruch. Im Schlagwerk wurde der 3,43 kg wiegende Hojer durch 0,1 m Höhe fallen gelassen, ohne dass eine gleiche Leiste brach. Es wurde der Bruch erst bei einer Fallhöhe von 0,21 m erzielt, was einer Arbeit von 0,72 mkg entspricht. Hier verhält sich also die Druckarbeit zur Schlagarbeit für den Bruch wie 1 : 2,4.

Ein Glasstab von 6 mm Durchmesser wurde an einem Ende zwischen Bleibacken im Schraubstock eingespannt, an dem anderen Ende, im Abstande von 17 mm, eine Wagschale im Gewichte von 235 g aufgehängt.

*) Vergl. den früher angezogenen Artikel in Dingler's Journal.

Es betrug bei der Belastung von 0,235 kg die Biegung 2 mm
„ „ „ „ „ „ 0,435 „ „ „ 3 „
„ „ „ „ „ „ 0,735 „ „ „ 4 „
„ „ „ „ „ „ 0,985 „ „ „ 5 „
„ „ „ „ „ „ 1,135 „ erfolgte der Bruch.

Das Diagramm liefert als Brucharbeit näherungsweise 0,34 kgcm.

Fallproben mit gleichen Glasstäben.

20 g durch 10 cm Höhe auf das Ende des Stängelchens fallen gelassen, entsprechend einer Arbeit von 0,2 kgcm, kein Bruch,
50g durch 10cm Höhe, entspr. „ „ „ 0,5 „ „ „
100g „ „ „ „ „ „ „ 1,0 „ erfolgte der Bruch.

Es ist daher auch aus diesem Versuche zu entnehmen, dass für dieselbe Deformationsarbeit (Bruch) bei Anwendung von Stössen eine grössere Arbeitsleistung erforderlich ist. Es stellt sich die Druckarbeit zur Stossarbeit ungefähr wie 1 : 2.

Bei allen hier erwähnten Versuchen ist als die, zu einer bestimmten Formänderung bei Anwendung ruhigen Druckes erforderliche Arbeitsgrösse jene verstanden, welche sich aus dem Diagramme ergibt; dies ist aber die thatsächlich von dem Werkstücke bei seiner Formveränderung aufgenommene, beziehungsweise zu dieser nöthige Arbeit. Es ist dies die reine Nutzarbeit. Jene Arbeitsgrösse, welche thatsächlich der Festigkeitsmaschine zugeführt werden musste, um die Nutzarbeit zu leisten, wird nicht bestimmt; sie ist aber jedenfalls von der Construction dieser Maschine abhängig und wird verschieden sein, je nachdem man Hebelwerke, Schrauben oder hydraulische Vorrichtungen anwendet.

Es ist ganz gut, dass die Festigkeitsmaschinen die reine Nutzarbeit angeben; aber will man den Vergleich zwischen Druck- und Schlagarbeit vornehmen, so muss man auch jene Arbeitsgrösse ermitteln, welche thatsächlich beim Schlage zur Formänderung des Arbeitsstückes verbraucht wurde, bezw. man muss auch hier die Nutzarbeit bestimmen und sich nicht damit begnügen, die Schlagarbeit aus dem Producte aus Hammergewicht mal Hubhöhe zu berechnen.

Die diesbezüglichen Schwierigkeiten sind bei den gewöhnlichen Schlagwerken geradezu unüberwindlich gross, denn es lässt sich jene Arbeitsgrösse, welche durch den Amboss aufgenommen wird und verloren geht, nicht ermitteln. Sowie der Amboss beweglich gemacht wird und auf eine Feder oder dergl. die aufgenommene Arbeit abgiebt, so wird die Art des Schlages bereits geändert und man erhält zweifelsohne Angaben, welche jene Verhältnisse nicht direct kennen lehren, die beim Schlage auf festgestelltem Ambosse vorhanden sind.

Obwohl mithin eine Anordnung mit beweglichem Ambosse nicht gleichbedeutend den gewöhnlichen Anordnungen mit festem Ambosse sein kann, so ist in ersterer doch das einzige der Zeit bekannte Mittel ge-

geben, jenen Theil der Arbeitsgrösse zu bestimmen, welche durch das Werkstück auf den Amboss übertragen wird.

Die benutzte Anordnung, ein ballistisches Schlagwerk, ist in den Fig. 3—7, Taf. III dargestellt. Die Anordnung dieses Schlagwerkes ist nicht neu*), doch dürfte dasselbe nicht allgemein bekannt sein, so dass eine kurze Beschreibung desselben hier Platz finden möge.

Dieser Apparat besteht aus einem Hammer *H* und einem Amboss *A*, beide aus Maschinengusseisen, welche je an vier Ketten *K* und Schnüren *s* von gleicher Länge aufgehängt sind. Die Verticalebene, welche sich durch die beiden zusammenfallenden (conachsialen) Achsen der Schlagklötze legen lässt, ist die Schwingungsebene derselben. Ihre Schlagflächen müssen auch während der Bewegung stets vertical bleiben, weil je zwei auf einer Seite der Schwingungsebene liegende Aufhängepunkte an der Decke und die zugehörigen zwei Befestigungspunkte am Schlagklotze stets ein Parallelogramm bilden, so lange die Schnüre gleiche Länge besitzen und behalten. Hammer und Amboss, oder die beiden Schlagklötze hängen jeder an vier Schnüren, deren Befestigungspunkte sich unter dem Schwerpunkte der Schlagklötze befinden müssen, weil gerade dadurch die Führung der Klötze eine ruhigere wird und der centrale Stoss, welcher hier allein beabsichtigt ist, keine derartigen Schwankungen des Schlagklotzes bewirken kann, wie sie bei der Aufhängung über dem Schwerpunkte auftreten müssten. Während der Dauer des Stosses findet nur eine etwas kräftigere Spannung beider Schnurpaare statt.

Die Aufhängung der beiden Schlagklötze ist, wie aus den Figuren ersehen werden kann, eine solche, dass die Achsen der beiden Klötze sich bei ihren Schwingungen nur in derselben Verticalebene bewegen können. Eine Abweichung hiervon kann nur insofern stattfinden, als sich ungleiche Dehnungen der Schnüre äussern.

Zwischen den Ketten *K* und den Schnüren *s* sind Justirvorrichtungen, Spannzwingen, angebracht, welche in Fig. 7, Taf. III besonders dargestellt sind und welche nothwendig sind, um die Schlagflächen (wirksamen Endflächen) genau normal zur Schwingungsebene und zu einander parallel einstellen zu können. Diese Justirvorrichtungen reichen jedoch hierzu wegen der bedeutenden Dehnungen der Schnüre oder Stricke nicht aus, sondern es ist die entsprechende Verkürzung oder Verlängerung der Ketten gleichfalls erforderlich. Es hat seine besonderen Schwierigkeiten, die Schlagflächen genau parallel zu einander nnd normal zur Schwingungsebene zu bringen. Man muss, um dies zu erreichen, die Schnittlinie jener Ebene mit der Bodenfläche bestimmen und auf diese eine Senk-

*) Die Mittheilung über die Constructionsdetails, welche in der Hauptsache unverändert blieben, verdankt der Autor dem Herrn Ingen. Arm. Prückner, d. Z. in Nürnberg, welcher ein ähnliches Schlagwerk am Polytechnikum in München zu Versuchen benutzte. Zuerst wurde dasselbe wohl zur Bestimmung des Wärmeäquivalentes verwendet.

rechte dort errichten, wo in der Ruhelage sich die beiden Schlagflächen nahestehen. Durch diese Senkrechte erhält man erst die nothwendige Visirlinie, nach welcher man, bei langsamer Bewegung des einen oder anderen Schlagklotzes, beurtheilen kann, ob dessen Schlagfläche senkrecht zur Schwingungsebene steht. Hierbei hat das Auge des Beobachters über den Schlagklötzen und vertical über der Visirlinie sich zu befinden und zu prüfen, ob bei der langsamen Bewegung die ganze Schlagfläche gleichzeitig über die Visirlinie tritt. Ist dies so genau als möglich erreicht, dann nähert man den kleineren Schlagklotz langsam dem grösseren und falls die Schlagflächen bei der Berührung dies nur an einer Kante thun sollten, rectificirt man an dem kleineren Schlagklotze, nachdem die genaue Verticalstellung der Schlagfläche des grösseren Schlagklotzes mittels der Wasserwage erzielt ist. Die Befestigungsweise an der Decke ist in Fig. 5, Taf. III, der Schlagklotz (Amboss) in Fig. 6 abgebildet.

Unterhalb der Schlagklötze befinden sich zwei gekrümmte Schienen *S*, *S'* auf welchen Reiter verschoben werden können, durch deren Beihilfe die Bögen, welche die Schlagklötze durchlaufen haben, bestimmt werden können. Hierzu haben wir jedoch nur die Schiene *S* unter dem grösseren Schlagklotze benöthigt; während die zweite Schiene *S'* dazu benutzt wurde, zu erkennen, ob bei der Erhebung des Hammers dessen Mittelebene mit der verlangten Schwingungsebene zusammenfällt und sich die unvermeidlichen Schwankungen genügend beruhigt hatten. Die Erhebung des Hammers geschah durch eine Person, welche denselben an den hintern Befestigungsstellen der Ketten ergriff, eine zweite Person hakte in einen in der Mitte der Rückfläche des Hammers befestigten Ring den Haken einer Schnur ein, welche an der in der Mauer des Lokales eingelassenen Ringschraube *n* befestigt war. Nun wurde am Amboss der zu deformirende Gegenstand befestigt, was in verschiedener Weise, je nach seiner Beschaffenheit, geschah und später bei den einzelnen Experimenten besprochen werden soll. Nachdem alles zur Durchführung des Schlages vorbereitet war, wurde die kräftige, den Hammer haltende Schnur durch eine solche ersetzt, welche einen schwächeren Theil, der leicht abgebrannt werden konnte, enthielt, die Höhenlage des Hammers direct von einer horizontalen Bodenleiste aus gemessen und nach eingetretener völliger Ruhe des Hammers durch Abbrennen der Schnur der Schlag veranlasst. Das Abbrennen der Schnur ist das einzige Mittel, einen wirklich centralen, von seitlichen Schwingungen freien Schlag zu erzielen.

An der Rückseite des Ambosses wurde eine Gabel angebracht, deren Zinken, rechts und links neben der Schiene *S* sich bewegend, einen auf dieser sitzenden Weissblech-Reiter verschoben, wodurch der vom Stosse bedingte Ausschlag des Ambosses gemessen werden konnte. Diesem Ausschlage, beziehungsweise Hub des Ambosses *G H*, entspricht jener Theil der Schlagarbeit, welcher von dem Werkstücke auf den Amboss übertragen wurde. Beobachtet man die Er-

scheinungen beim Schlage, so sind sie folgende: Der Hammer fällt nach dem Abbrennen der Schnur und trifft das Arbeitsstück. Je nach der Natur desselben ist die Dauer der Berührung zwischen Hammer, Werkstück und Amboss verschieden, aber stets nur kurz. Der Hammer verliert hierbei nahezu seine ganze lebendige Kraft, welche theils zur Deformation des Werkstückes, theils zur Beschleunigung des Ambosses verbraucht wird. Ein elastischer Rückstoss findet bei bildsamen und bei hämmerbaren Materialien (Thon, Kupfer u. dgl.) nicht statt, sondern der Amboss hat nach dem Stosse eine gewisse Geschwindigkeit erlangt, bewegt sich aufwärts, wobei er jene Höhe $H$ erreicht, welche mit seinem Gewichte $G$ multiplicirt die aufgenommene Arbeitsgrösse bestimmt. Hierauf fällt natürlich der Amboss, beziehungsweise er pendelt zurück, erreicht den Hammer und schleudert denselben von sich. Bei dem gebrauchten Apparate wurde durch einen am Boden befestigten Prellklotz der Amboss verhindert, über seine Ruhelage hinaus sich gegen den Hammer zu bewegen.

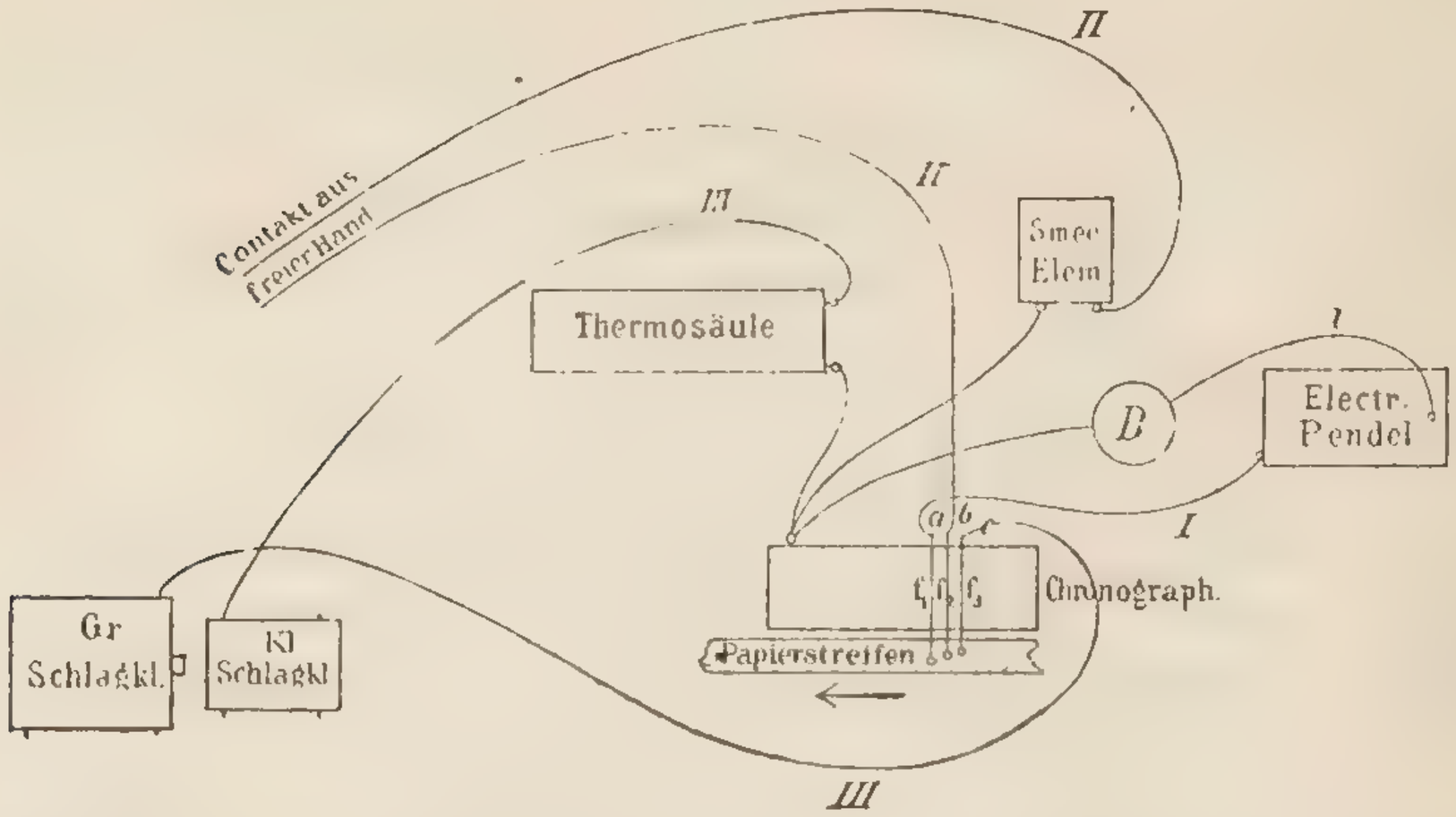
Die zahlreichen, mit dem ballistischen Schlagwerke vorgenommenen Versuche mit Kupfercylindern und solchen aus Thon sollten einerseits Klarheit über die vom Amboss aufgenommene Arbeit und dadurch über die zur Formänderung selbst verbrauchte Arbeit liefern, andererseits sollten sie die Dauer des Stosses oder die Zeit der formändernden Einwirkung kennen lehren. Für den letztgenannten Zweck wurde zuerst ein Chronograph von Hipp, später ein Stimmgabel-Chronograph verwendet.*)

Das Schema der Aufstellung der Apparate bei Anwendung des Hipp'schen Chronographen zeigt Fig. 40. Es sind hierbei drei complette Stromkreise benutzt worden. Der erste Stromkreis (*I*), gebildet durch das galvanische Element $B$, das elektrische Pendel und den Chronographen (Feder $f_1$). Der zweite Stromkreis (*II*), gebildet durch das Smee-Element, den aus freier Hand zu bildenden Contact und den Chronographen (Feder $f_2$); endlich der dritte Stromkreis (*III*), bestehend aus der Thermosäule, den während der Schlagdauer durch das Werkstück leitend verbundenen Schlagklötzen und dem Chronographen (Feder $f_3$). Jeder Stromkreis war somit von den anderen unabhängig. Der endlose Papierstreifen bewegte sich in der Richtung des Pfeiles und die drei Federn beschrieben parallele Linien auf demselben. So oft einer der Stromkreise geschlossen wurde, functionirte der betreffende Elektro-Magnet am Chronographen, falls die Schliessungsdauer eine hinlängliche war; die eingeschaltete Feder erlitt eine Ablenkung und der Strich zeigte dem entsprechend eine Ablenkung. Fig. 41 zeigt die Copie der Aufschreibung des Chronographen bei einem Versuche mit einem Thon-

*) Für die leihweise Ueberlassung des Hipp'schen Chronographen bin ich dem Herrn Collegen Prof. A. Harlacher, für jene des Stimmgabel-Chronographen und elektrischen Pendels, sowie insbesondere für die Anleitung bei Aufstellung der Apparate dem Herrn Prof. Dr. Adalb. v. Waltenhofen zu bestem Danke verpflichtet.

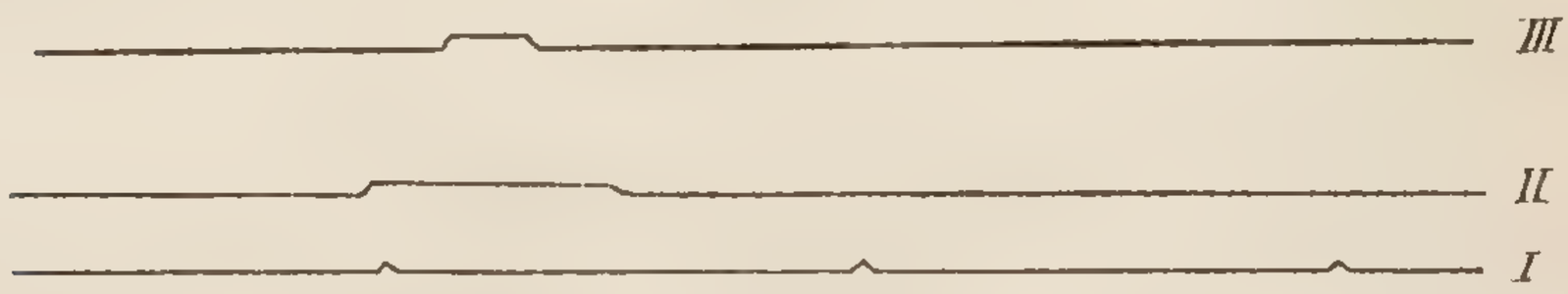
cylinder. Die Linie *I* entspricht den Einwirkungen des elektrischen Sekundenpendels, welches Sekunde für Sekunde einen Stromschluss dadurch liefert, dass die Stahlspitze des Pendels durch die convexe Oberfläche des Quecksilbers streicht. Die Linie *II* entspricht dem aus freier Hand hergestellten Contacte, welcher vom Beobachter während der dem

Fig. 40.




Auge erscheinenden Dauer der Berührung von Hammer und Werkstück hergestellt wurde, und die Linie *III* dem Stromkreise *III*, also der Berührung von Hammer und Werkstück. Der Thoncylinder musste einer-

Fig. 41.




seits in haltbare Verbindung mit dem Amboss gebracht, andererseits eine leitende Verbindung für die Dauer des Schlages erzielt werden; beides wurde dadurch erreicht, dass eine Weissblechplatte mittels federnder Drähte mit dem Amboss verbunden wurde, zwischen welcher und der Schlagfläche des Ambosses der Thoncylinder leicht geklemmt am Herabfallen gehindert war. Die Daten der diesbezüglichen Versuche folgen nach, hier genügt es zu erwähnen, dass die Schlagdauer, während welcher ein Thoncylinder von 83,5 mm Höhe und 56 mm Durchmesser in eine Scheibe von 12,5 mm Höhe und 145 mm Durchmesser verwandelt wurde, nur $^1/_5$ Sekunde betrug. Wurde ein Blei- oder ein Kupfercylinder den Einwirkungen des ballistischen Schlagwerkes ausgesetzt, so gab der Chronograph keine Anzeige mehr. Um zu ermitteln, für welche Zeitdauer noch wahrnehmbare Anzeigen erlangt werden können, wurden dem Pendel grössere und grössere Ausschläge gegeben, bis die Markirung verschwand. Aus dem Pendelausschlag wurde die Geschwindigkeit des-

selben im tiefsten Punkte und die Zeit des Contactes mit dem Quecksilber ermittelt und dadurch festgestellt, dass der Hipp'sche Chronograph noch für die Zeitdauer von 0,01 Sekunde ein merkbares Zeichen liefert, daher musste die Contactdauer bei dem verwendeten Blei- und dem Kupfercylinder kleiner als 0,01 Sekunde gewesen sein.

Zur Bestimmung dieser äusserst kurzen Contactdauer wurde ein anderer Apparat in Verwendung genommen, welchen Fig. 42 darstellt.

Fig. 42.

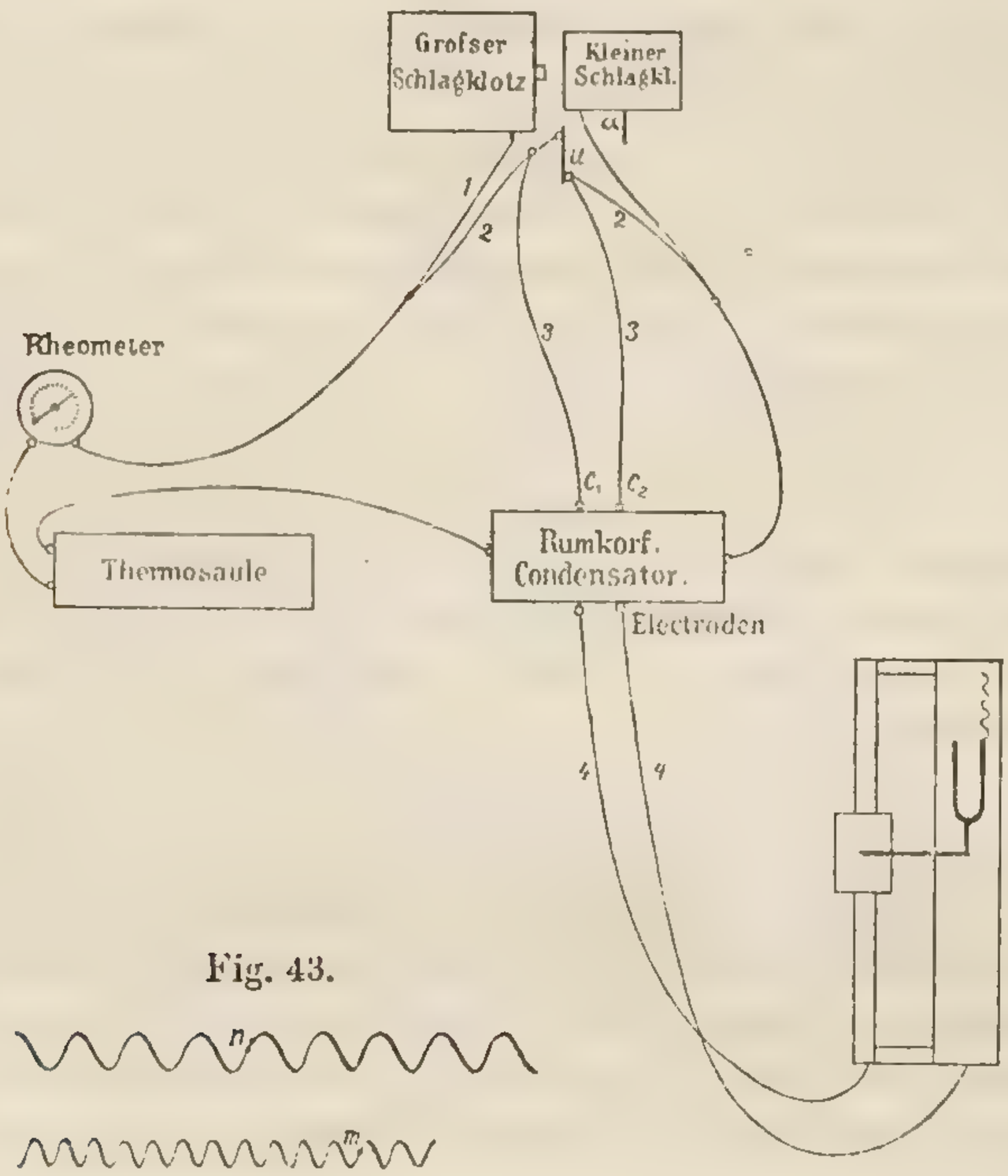



Fig. 43.




Bei diesem diente zur Zeitmarkirung ein Vibrations- oder Stimmgabel-Chronograph (Chronoskop) in Verbindung mit einem Rumkorf'schen Condensator. Der von der Thermosäule ausgehende Strom gelangte durch die Drähte *2, 2* zur Hauptspirale des Rumkorf'schen Inductionsapparates. Dieser Stromkreis war durch die Drähte *3, 3* mit dem Condensator in Verbindung, um den bei der Unterbrechung auftretenden Extrastrom unschädlich zu machen. Beim Falle des Hammers oder kleinen Schlagklotzes gegen den grossen öffnete eine an ersterem angebrachte Schiene den Unterbrecher *u*; dadurch wurde der Strom in *2, 2* unterbrochen und es sprang der Inductions-Oeffnungsfunke durch *4, 4* eilend von der Stimmgabelspitze durch das berusste Papier in die metallische Unterlage desselben und ging von dieser zum Pole der Inductionsspirale oder zur Elektrode zurück. Sogleich nach Oeffnung dieses ersten Stromes erfolgte die Berührung zwischen Hammer, Werkstück und Amboss, und durch diese war der Stromkreis *1, 1* geschlossen, welcher seine Oeffnung nach

vollbrachter Deformation erlitt, und nun fand neuerlich das Ueberspringen eines Funkens von der Spitze der Stimmgabel statt. Die Zeitdifferenz zwischen dem Oeffnen des ersten Stromes und jenem des zweiten wurde aus der Anzahl der Wellen, welche zwischen beiden Markirungen (Funkenübergängen) lagen, bestimmt. Fig. 43 zeigt Bruchstücke der erhaltenen Wellenlinien und bei *n m* sind die Funkenmarkirungen angedeutet.

Die manuelle Arbeit bei Vornahme dieser Versuche war durchaus nicht schwierig, denn der Standort des Chronoskops konnte so gewählt werden, dass das Abziehen der Stimmgabel vom Anker und die Weiterbewegung des die Stimmgabel tragenden Schlittens jene Zeit, in welcher der Schlag erfolgte, mit aller Bestimmtheit in sich schloss. Für die Zeitdauer der Deformation von Thoncylindern wurden auf diese Weise genaue Angaben erzielt.* Leider war dies bezüglich der Zeit der Formänderung von Kupfer- und Blei-Probestücken nicht der Fall, weil infolge der losen Befestigung dieser Stücke am Amboss die Oeffnung jenes Stromes, welcher während der Zeit der Formänderung herrschte, zu allmälig erfolgte. Dadurch war der zweite Oeffnungsfunke schwach, die Markirung unsicher, zudem zuweilen mehrere Funken rasch einander folgend das Resultat noch mehr beeinträchtigten. Bei Thon war die Befestigung in der früher (S. 104) erwähnten Weise leicht und die Weissblechtafel schlug sich so fest an, dass die Oeffnung des durch *1, 1* gehenden Stromes plötzlich erfolgte. Doch auch hier stellte sich dann, wenn die Thonschichte geringe Höhe aber grossen Durchmesser erlangt hatte, eine unerwartete Fehlerquelle in dem Einflusse des Luftdruckes ein, durch welchen ohne Zweifel der mit seiner vollen Schlagfläche an der Weissblechtafel anschliessende Hammer noch eine geringe Wegstrecke, beziehungsweise durch etwa 0,1 Sekunde, nachgeschoben wurde, so dass die Zeit der Schlagwirkung in diesen Fällen entschieden zu gross gefunden wurde.

Die Befestigung von Metallstücken an der Schlagfläche des Ambosses bietet ausserordentliche Schwierigkeiten dar. Wachs hält nur so lange, bis der Schlag erfolgt ist; denn es löst sich das geschlagene Werkstück unmittelbar nachdem die Einwirkung vorüber ist ab, wobei es so lange an den Schlagflächen von Amboss und Hammer gleichsam lehnt, bis dieselben sich soweit von einander entfernt haben, um ein Abfallen des Werkstückes zuzulassen. Hier kann natürlich von einer scharfen Unterbrechung des Stromschlusses keine Rede sein. Etwas besser, aber auch für genaue Zeitmessung der Dauer der Formänderung ungeeignet, ist die Befestigung des Werkstückes an der Schlagfläche des Amboss mittels Unterstützung durch eine Lehmwulst. Man behält hierdurch günstigsten Falles dasselbe zwar am Orte, aber die Unterbrechung der Stromleitung ist doch ungenau. Eine Befestigung mittels Bindedrähten erwies sich gleichfalls als zu elastisch, und es wurde endlich zu einer solchen mit centrischer Schraube, eingelassen in Amboss und Werkstück, übergegangen;

doch selbst diese Verschraubung wurde durch die Stosswirkung locker und führte nicht zu vollkommen klaren Resultaten. Dies der Grund des negativen Erfolges. Es konnte die Dauer der Einwirkung des Schlages weder bei Kupfer noch bei Blei, trotz vieler, langdauernder Mühewaltung, und trotz der tadellosen Function des Apparates mit Bestimmtheit ermittelt werden. Es darf dies auch aus dem weiteren Grunde nicht Wunder nehmen, weil die Stimmgabel in der Sekunde doch nur 253,3 ganze Wellen schrieb, daher bei den reinsten Oeffnungsfunken doch kein kürzerer Zeitraum als $^1/_{500}$ Sekunde, entsprechend einer halben Welle, hätte klar abgelesen werden können.

Die Schlagwirkung musste aber bei Kupfer in der Mehrzahl der Fälle in noch kürzerer Zeit verlaufen sein, wie nachstehende Betrachtung zeigt.

Mit Bezug auf die S. 3 und S. 47 besprochenen Druckproben mit Kupfercylindern ist der zur Formänderung erforderliche Druck ein sehr bedeutender, und es kann mit gutem Grunde angenommen werden, dass derselbe bei der Einwirkung des Hammers (des kleineren Schlagklotzes) auf das am Amboss befestigte Werkstück keinesfalls kleiner sein darf als bei Anwendung von ruhigem Drucke. Angenommen, es sei die Formänderung des ursprünglich cylindrischen Kupferstückes von 18 mm Höhe und Durchmesser nur bereits so weit gediehen, als dieselbe durch eine Pressung von 15 000 kg getrieben werden kann, so muss die Pressung zwischen Hammer, Werkstück und Amboss zu weiterer Formänderung mindestens diesen Werth betragen. Wäre dieselbe constant, so würde die Pressung mal der Zeit gleich der Masse mal der Geschwindigkeit des Hammers sein müssen, damit derselbe von der Geschwindigkeit $v$ zur Geschwindigkeit *Null* gelangt,

$$\text{oder } Kt = Mv = \frac{G}{g} v,$$

woraus

$$t = \frac{G}{gK} \cdot v$$

folgen würde. Für

$$K = 15\,000 \text{ kg}, \; g = 9{,}8, \; G = 52{,}34 \; v = 2{,}5$$

erhält man

$$t = \frac{52{,}34 \,.\, 2{,}5}{9{,}8 \,.\, 15{,}000} \doteq {}^1/_{1000} \text{ Sekunde.}$$

Alle Annahmen dieser Rechnung sind derartig gemacht, dass die Zeit eher zu gross gefunden werden musste; die Schlagdauer bei Anwendung des Hammers von 52,34 kg Gewicht und der Fallhöhe 0,3 m auf ein Kupferwerkstück, welches zu seiner Formänderung bereits eines Druckes von mindestens 15 000 kg bedarf, beträgt demnach jedenfalls weniger als $^1/_{1000}$ Sekunde.

Hier mag bemerkt werden, dass der (variable) Druck $K$, welchen das Werkstück vom Hammer empfängt, nicht zu einem genau gleichen

Drucke zwischen Werkstück und Amboss führt. Wären diese Drucke stets gleich, so müsste

$$\int_{t_0}^{t_1} K dt = M_1 v_1 = M_2 v_2$$

sein, d. h. die Geschwindigkeit $v_1$, mit welcher der Hammer bei Beginn des Schlages wirkt, müsste zur Geschwindigkeit $v_2$, welche der Amboss am Ende der Stossdauer erlangt hat, sich verkehrt wie die Massen (Gewichte) der Schlagklötze verhalten. Hieraus aber würde folgen, dass sich die Schlagarbeit des Hammers $A_1$ zu der vom Ambosse aufgenommenen Arbeit $A_2$ stets verkehrt wie deren Gewichte verhalten müssten. Indem dies die Versuche verneinen, so folgt, dass die Fortpflanzung des Druckes nicht momentan stattfindet.

Maassangaben zum ballistischen Schlagwerke.

Das Gewicht des Ambosses betrug . . . 103,69 kg,
„ „ „ Hammers „ . . . 52,34 „
Die Länge der Schnüre 3,65 m.

Durch Schwingenlassen jedes der Schlagklötze für sich, und Ermittelung der allmäligen Verminderung des Ausschlages wurde der hierbei stattfindende Verlust an Arbeit ermittelt. Dieser Verlust beträgt für die halbe Schwingung, d. i. für den Uebergang aus der tiefsten in die höchste Lage (oder umgekehrt) ca. 1 bis 1,3 Proc. der lebendigen Kraft, welche in dem kleinen oder grossen Schlagklotze enthalten ist. Hierdurch gehen bei einem Stosse ca. 2,5 Proc. der Arbeit verloren.

### 1. Versuche mit Kupfercylindern an dem ballistischen Schlagwerke.

Es wurde jener, bereits tonnenförmig deformirte Kupfercylinder zur Probe verwendet, welcher seiner Zeit den zweiten Controlpunkt (2) des Diagrammes A, Fig. 1, Taf. I gegeben hatte. Seine Höhe betrug 17,0 mm, der Durchmesser in der halben Höhe 18,66 mm.

| Schlag No. | Fallhöhe des Hammers mm | Lebendige Kraft des Hammers mkg | Hub des Ambosses mm | Vom Amboss aufgen. Arbeit mkg | Höhe des Cylinders nach dem Schlage mm | Zur Formänderung verbrauchte Schlagarbeit mkg | Druckarbeit für die gleiche Formänderung mkg |
|---|---|---|---|---|---|---|---|
| 1 | 320 | 16,75 | 44 | 4,56 | 15,6 | 12,19 | 9,0 |
| 2 | 321 | 16,80 | 45 | 4,66 | 14,8 | 12,14 | 6,9 |
| 3 | 290 | 15,18 | 45 | 4,66 | 14,0 | 10,52 | 8,0 |
| 4 | 277 | 14,50 | 45 | 4,66 | 13,4 | 9,84 | 6,7 |
| 5 | 280 | 14,66 | 49 | 5,08 | 12,8 | 9,58 | 7,3 |
| 6 | 278 | 14,55 | 49 | 5,08 | 12,3 | 9,47 | 6,5 |
| 7 | 380 | 19,89 | 63 | 6,53 | 11,7 | 13,36 | 8,5 |
| 8 | 355 | 18,58 | 66 | 6,84 | 11,2 | 11,74 | 7,6 |
| Summe | — | 130,91 | — | 42,07 | — | 88,84 | 60,5 |

Die in der letzten Columne stehenden Zahlen sind aus dem Diagramme A, Fig. 1, Taf. I ermittelt. Aus den beiden letzten Columnen dieser Tabelle ist zunächst ersichtlich, dass die zur Formänderung durch

Schläge benöthigte Arbeitsgrösse, nach Abzug der in den Amboss gegangenen Arbeit, nur um ca. 46 Proc. grösser ist, als jene Arbeitsgrösse, welche zu der überaus langsamen Formveränderung mittels der Festigkeitsmaschine erforderlich war, letztere als 100 genommen.

Von der totalen Schlagarbeit oder der lebendigen Kraft des Hammers sind durchschnittlich 32 Proc. zum Hub des Ambosses verwendet worden; 68 Proc. scheinen zur Formänderung des Werkstückes verbraucht worden zu sein, doch in diesen 68 Proc. sind alle anderen, theilweise nicht bestimmbaren Arbeitsverluste enthalten. Nachdem die bei ruhigem Druck aufzuwendende Arbeitsgrösse 46 Proc. des Arbeitswerthes der Stösse betrug, so verbleiben nur 22 Proc. der aufgewendeten Arbeit als scheinbar verloren, sie mussten in den Vibrationen der Massen des ballistischen Schlagwerkes und der Erwärmung des Werkstückes verbraucht worden sein.

Angenommen, es wäre dieser Verlust zur Gänze zur Erwärmung des Arbeitsstückes verbraucht worden, so hätte die Temperatur des Kupferstückes nach einem Schlage um 1,5° C. wachsen müssen*), welcher geringe Wärmezuwachs bereits schwer bestimmbar ist.

Die Tabelle lässt ferner deutlich erkennen, dass die vom Amboss aufgenommene Arbeitsgrösse bei den auf dasselbe Object geführten späteren Schlägen im Verhältnisse zur lebendigen Kraft des Hammers wächst; eine Erscheinung, welche sich leicht dadurch erklärt, dass das Werkstück durch die fortgesetzte Einwirkung immer härter wird, daher immer weniger geeignet ist, die Stosswirkung als Verschiebungsarbeit seiner Theilchen zu consumiren. Dieses Härterwerden findet aber auch bei der Formänderung durch ruhigen Druck statt, wie dies theilweise der Vergleich der beiden letzten Columnen der Tabelle, noch viel deutlicher aber jene Versuche beweisen, welche S. 78 (Fig. 5, Taf. I) besprochen wurden.

Bei Vornahme der besprochenen Versuche wurde zwar wiederholt das Schlagwerk in Bezug auf die richtige, parallele Lage der Schlagflächen rectificirt; dennoch wurde nicht jene nahezu mathematische Regelmässigkeit der Formänderung erhalten, wie mittels der Festigkeitsmaschine (Fig. 1, A und Fig. 2, Taf. I), sondern beim Messen der Höhen des deformirten Stückes zeigten sich Unregelmässigkeiten von 0,1 bis 0,3 mm, und die Zahlen für die Höhenangaben des Probestückes sind die Mittelwerthe, daher mit Fehlern behaftet, welche natürlich auch auf die Ermittlung der Zahlen für die Druckarbeit Einfluss nehmen mussten.

Interessant ist auch die Nebeneinanderstellung der vorstehenden Versuche mit dem ballistischen Schlagwerke und jenes Schlagversuches mit dem Cylinder $C_3$ (Tabelle S. 89); wir erhalten:

---

*) 88,84 — 60,5 = 28,34 mkg; es entfällt auf einen Schlag ca. 3,54 mkg. Der Versuchskörper wog 40,546 g. Die specifische Wärme des Kupfers beträgt 0,0952, man erhält demnach

$$t = \frac{3{,}54 \times 1000}{624 \times 40{,}546 \times 0{,}0952} = 1{,}5^{\circ}\ \text{C.}$$

Der Kupfercylinder $C_a$
$h = 18{,}0$ mm $d = 18{,}0$
vom Gewichte $G = 40{,}546$ g
wurde zunächst auf der Festigkeitsmaschine Professor Gollner's gedrückt auf
$h' = 17{,}0$ mm, $d' = 18{,}66$;
die weitere Formänderung erfolgte durch das ballistische Schlagwerk:

Der Kupfercylinder $C_b$
$h = 18{,}2$ mm, $d = 17{,}95$
$G = 40{,}615$ g
erhielt einen Schlag von
$1{,}671$ m $\times$ $6{,}7$ kg $= 11{,}196$ mkg;
hierdurch wurde:
$h' = 16{,}5$, $d' = 18{,}95$;
die weitere Formänderung fand im gewöhnlichen Schlagwerke (Verticalhammer) statt:

| Schlag Nr. | Lebendige Kraft des Hammers mkg | Höhe des Cylinders nach dem Schlage mm | Schlag Nr. | Lebendige Kraft des Hammers mkg | Höhe des Cylinders nach dem Schlage mm |
|---|---|---|---|---|---|
| 1 | 16,75 | 15,6 | 1 | 7,839 | 15,8 |
| | | | 2 | „ | 15,3 |
| 2 | 16,80 | 14,8 | 3 | „ | 14,8 |
| | | | 4 | „ | 14,4 |
| 3 | 15,18 | 14,0 | 5 | „ | 14,0 |
| | | | 6 | „ | 13,64 |
| 4 | 14,50 | 13,4 | 7 | „ | 13,3 |
| | | | 8 | „ | 13,0 |
| 5 | 14,66 | 12,8 | 9 | „ | 12,75 |
| | | | 10 | „ | 12,45 |
| 6 | 14,55 | 12,3 | 11 | „ | 12,20 |
| | | | 12 | „ | 12,0 |
| 7 | 19,89 | 11,7 | 13 | „ | 11,7 |
| | | | 14 | „ | 11,55 |
| 8 | 18,58 | 11,2 | | | |

Der Cylinder $C_a$ hatte nach dem zweiten Schlag dieselbe Höhe wie der Cylinder $C_b$ nach dem dritten; desgleichen sind die Höhen nach dem siebenten bezw. dreizehnten Schlage einander gleich.

Die Summe der Schlagarbeiten vom vierten bis siebenten Schlage betrug bei dem ballistischen Schlagwerke 63,6 mkg, bei dem gewöhnlichen Schlagwerke vom sechsten bis dreizehnten Schlage $8 \,.\, 7{,}839 = 62{,}712$ mkg, ist also trotz der doppelten Schlagzahl, welche im ungünstigen Sinne Einfluss nimmt, nicht grösser. Hieraus lässt sich der Schluss ziehen, dass beim Verticalhammer keinesfalls mehr Arbeit durch den Amboss hat verloren gehen können, als dies beim ballistischen Schlagwerke der Fall war, dass vielmehr im Gegentheil durch den festen Amboss des Verticalhammers weniger Arbeit aufgenommen werden musste.

Die Geschwindigkeiten der Schlagklötze verhielten sich in beiden Fällen näherungsweise wie $\sqrt{0{,}3} : \sqrt{1{,}2} = 0{,}548 : 1{,}095 \doteq 1 : 2$, d. h. bei dem Verticalhammer waren sie nahe doppelt so gross als beim ballistischen Schlagwerke.

Würde nun für eine mit grösserer Geschwindigkeit vorzunehmende Formänderung ein wesentlich grösserer Arbeitsaufwand erforderlich sein,

so hätte das Ergebniss dieser Versuche ein anderes sein müssen. Der gemachte Vergleich bestätigt den auf S. 91 ausgesprochenen Satz, dass der Einfluss der Geschwindigkeit kein bedeutender ist.

Bei derlei Dingen führt das Experiment nur ganz allmälig zur Erkenntniss der Wahrheit, doch als Vermuthung darf wohl ausgesprochen werden, dass bei vielen homogenen Materialien der Widerstand jedes Materialtheilchens gegen Verschiebung unter übereinstimmenden Verhältnissen stets ein bestimmter ist und für grössere Geschwindigkeiten zur Beschleunigung des Theilchens zwar stärkere Kräfte erforderlich sind, deren Beschleunigungsarbeit schliesslich als Wärme zum Ausdruck kommt, dass aber die hierzu thatsächlich verbrauchte Arbeit gegen die Gesammtarbeit zur Formänderung nur einen kleinen Theil ausmacht.

Dieser Satz scheint in Widerspruch mit Beobachtungen zu stehen, welche theils früher Aufnahme in dieser Schrift gefunden haben (S. 96 bis 100), theils anderweitig namentlich bei Zerreissversuchen gemacht wurden. Es scheint dies jedoch nur so, und dieser Widerspruch wird sich im Folgenden (S. 112) lösen.

### 2. Versuche mit Cylindern aus plastischem Thone.

Das Material dieser Cylinder war Thon, wie derselbe in der Bodenbacher Siderolithfabrik des Herrn Schiller zu rother Waare (der Thon brennt sich roth) verwendet wird; der Wassergehalt betrug ca. $20^1/_2$ Proc., derselbe wurde bestimmt durch Trocknen im Luftbade bei ca. $125^0$ C.

| Thon-Cylinder Nr. | Abmessungen vor dem Schlage in mm $h$ | $d$ | Abmessungen nach dem Schlage in mm $h'$ | $d_m$ | Lebendige Kraft des Hammers mkg | In den Amboss übergegangene Arbeit mkg | Zur Formänderung verbr. Arbeit mkg | Druckarbeit zu gleicher Formänderung mkg | Schlagdauer in Sekunden (Contactdauer) | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| I | 68 | 56 | 21,6 | 104 | 5,234 | 1,04 | 4,19 | 3,02 | 0,27 | mittels des Chronographen bestimmt. |
| II | 83,5 | 56 | 11,4 bis 13,7 | 143 bis 148 | 18,21 | 4,15 | 14,06 | — | 0,28 | |
| III | 76,5 | 56 | 9,5 bis 13 (11,4)* | 145 | 16,59 | 3,32 | 13,27 | 6,24 | 0,21 | |
| IV | 64 | 56 | 10 bis 11,5 | 142 | 16,75 | 3,32 | 13,43 | — | — | |
| V | 76 | 56 | 12 bis 12,5 | 138 bis 142 | 16,80 | 3,63 | 13,17 | — | — | |
| VI | 76,5 | 56 | 12,5 bis 13,5 | 135 bis 136 | 16,12 | 3,47 | 12,65 | 5,5 | 0,208 | mittels des Chronoskops bestimmt. |
| VII | 19 | 57 | 3,64* | 130 | 16,33 | 3,63 | 12,70 | 4,5 | 0,16 | |
| 2. Schlag | | | 2,81* | 155 | 16,43 | 3,63 | 12,80 | — | 0,12 | |
| VIII | 13 | 57 | 2,7* | 125 | 16,59 | 3,84 | 12,75 | 4,9 | — | |
| 2. u. 3. Schlag | nicht gemessen | | | | 16,64 | 3,90 | 12,74 | — | — | |
| | | | | | 16,59 | 3,95 | 12,64 | — | — | |
| 4. „ | | | — | 175 bis 180 | 16,70 | 4,25 | 12,45 | — | 0,07 | |

Kritisiren wir nun diese Tabelle, so ist zuvörderst zu bemerken, dass den Angaben über die Abmessungen nach dem Schlage die wünschenswerthe Genauigkeit deshalb nicht zukommt, weil die Formänderung infolge nicht genau parallelen Vorwärtsschreitens der Schlagfläche nicht ganz regelmässig erfolgte. Die mit einem * bezeichneten $h'$ sind nicht gemessen, sondern berechnet. Schwer, ja beinahe unmöglich ist es ferner, dieses Material in ganz gleichem Wassergehalt zu erhalten, und doch ist erwiesen, dass Differenzen von 0,5 Proc. schon sehr bedeutend verschiedenes Verhalten bedingen. Die Druckproben fanden auf Professor Gollner's Festigkeitsmaschine statt, doch blieben auch hier, trotz vorsichtigen Centrirens, die Druckplatten nicht genau parallel, und infolge dessen wurden die bei den einzelnen Pressungen gemachten Höhenbestimmungen der Probestücke unsicher und mussten zur Construction der Diagramme, aus welchen die Grösse der erforderlichen Druckarbeit bestimmt wurde, Mittelwerthe gewählt werden. Hierdurch ist es möglich, dass den Zahlen der vorletzten Columne Ungenauigkeiten bis 20 Proc. anhaften. Betreffend die Fehlerquellen der Bestimmung der Contactdauer oder Dauer der Schlagwirkung wurde bereits S. 106 gesprochen, die angegebenen Zahlen sind gewiss grösser als sie wären, wenn der Luftdruck nicht die Contactdauer verlängern würde.

Trotz der geringeren Genauigkeit der Daten dieser Tabelle geht aus derselben doch unzweifelhaft hervor, dass bei dem Thone ein anderes Verhältniss zwischen Druckarbeit und Schlagarbeit besteht als bei Kupfer; u. zw. dass die erforderliche Arbeitsgrösse bei Anwendung von Schlägen wesentlich grösser ist als bei Anwendung von Druck. Wir finden hierin eine Bestätigung der Bemerkungen auf S. 96, und dürfte die Ursache theils in dem Einflusse des äusseren Luftdruckes, theils in jener des im feuchten Thone enthaltenen Wassers und der Luft liegen; letztere gibt einer eingeschlossenen Masse Thon eine gewisse Elasticität und diese dürfte auf die Dimensionen von Einfluss sein. Wenn in den S. 97 u. ff. angegebenen Versuchen für die Stossarbeit der 8-, ja 12fache Arbeitsbedarf als für Druckarbeit ausgewiesen erscheint, so kann dies von mannigfachen Umständen herrühren, welche hier kurz angedeutet sein mögen. Bei Schlagversuchen ermittelt man in der Regel das Gewicht des Fallbärs durch Wägung, ohne das eigentlich active Gewicht, d. h. jenes, welches nach Abzug der Reibung verbleibt, zu ermitteln. Ferner sind bei den meisten Schlagwerken zangenförmige Auslassvorrichtungen in Verwendung, welche im Momente des Auslassens dem Fallklotz einen seitlichen Impuls ertheilen, durch welchen der Schlagklotz während des Fallens bald an der einen bald anderen Seite der Führungen anstösst. Diese Stösse werden während des Falles immer intensiver und geht durch dieselben ein nicht bestimmbarer Theil der Schlagarbeit verloren. Diesem Fehler liesse sich zum Theil dadurch begegnen, dass die Zange nicht an einer festen Oese den Schlagklotz fasst, sondern an einer, mit einem kurzen Stück Drahtseil, Kette oder dergl. mit dem Schlagklotz verbundenen.

Eine weitere Fehlerquelle liegt in zu leichtem Amboss, eine andere in der Einschaltung eines Zwischenstückes, wie ein solches in Fig. 33, S. 92 dargestellt ist.

Bei Festigkeitsproben hat man wiederholt die Erfahrung gemacht, dass ein nur wenig rascheres Vorgehen die Resultate wesentlich beeinflusst. Dieser unleugbare Einfluss ist aber weit weniger den grösseren Geschwindigkeiten als den Ungleichförmigkeiten der Inanspruchnahme zuzuschreiben. Sobald mit einer Festigkeitsmaschine, möge sie mit hydraulischer Presse oder mit Schraube arbeiten, rascher gearbeitet wird, treten Ungleichförmigkeiten, Stösse oder doch Vibrationen auf, und deren Einfluss ist unleugbar. Ueberraschend ist diesbezüglich der Verticalschnitt durch horizontalgeschichtete, aber durch ruckweise Einwirkung der Kurbel (Fig. 1, Taf. III) zu ungleichförmigem Ausflusse aus dem Pressgefässe gebrachte Porzellanmasse, wie Fig. 44 darstellt. Vergleicht man diese Figur mit jener Fig. 6 Taf. I, welche die Schichtenverschiebung bei ziemlich gleichförmigem Kolbenvorgange aufweist, so sieht man sofort den merkwürdigen Einfluss ruckweiser Inanspruchnahme. Die Thatsache ist vorhanden, ihre Erklärung steht noch aus. — Aber die nachgewiesene Thatsache, dass ruckweise Inanspruchnahme zu ganz anderen inneren Verschiebungen führen kann, während bei sehr verschiedenen, aber von Null bis $v$ stetig wachsenden Geschwindigkeiten dieselben regelmässigen Verschiebungen auftreten, macht so manche sich widersprechenden Wahrnehmungen minder befremdend.

Fig. 44.

# Anhang.

## Einige Bemerkungen über Versuchsapparate, welche bisher unbesprochen geblieben.

**1. Schlagwerke.** Die constructive Durchführung der zwei im technologischen Cabinete befindlichen Schlagwerke ist einfach. Jenes Schlagwerk, dessen Schlagklotz ein actives Gewicht von 6,7 kg besitzt, ist aus zwei vertical gestellten eisernen Schienen gebildet, welche unten an die mit einem Amboss aus Bessemerstahl armirte, ca. 1 m lange, 0,35 m breite und 6 cm dicke Bodenplatte festgeschraubt sind, während sie oben an einer gusseisernen, an der Wand befestigten Console ebenso befestigt erscheinen. Die Schienen selbst sind aus breitem Flacheisen mit entsprechend verjüngt zugehobelten inneren Führungsflächen. Der Schlagklotz hat oben und unten beiderseits Führungsbacken, welche im verticalen Abstande von 220 mm von einander stehen. Um dies möglich zu machen, ist der untere massive Theil, in welchen der cylindrische Hammer eingesetzt ist, durch ein massives Rundeisen mit dem oberen Querkopfe verbunden. Ueber den oberen Führungsbacken sind nach aufwärts gerichtete, an den Innenflächen der Führungsschienen streifende Blattfedern angebracht, damit ein ruhiger gleichmässiger Fall erzielt wird. Dieser wird ganz besonders dadurch befördert, dass die centrische Aufhängung durch eine dünne Schnur erzielt wird, welche man abbrennt, wenn der Schlag gegeben werden soll.

Das active Gewicht des Schlagklotzes wird durch Wägung in der Weise ermittelt, dass der Schlagklotz mittels Schnur an dem einen Arme einer zweiarmigen Wage, welche an einer, über eine Rolle laufenden Schnur hängt, befestigt wird. Der zweite Wagbalken wird mit Gewichten belastet, bis während des Niederlassens der Wage, also auch des Schlagklotzes, Gleichgewicht herrscht.

Die Ungenauigkeiten dieser die Reibungseinflüsse mit berücksichtigenden Methode betragen kaum $^1/_2$ Proc.

Das Schlagwerk mit activem Gewichte von 0,56 kg ist noch einfacher, indem von einer nahe der Decke des Lokales befestigten Console zwei Drähte zur Schlagfläche des Ambosses gehen, in welcher sie dadurch befestigt sind, dass sie durch die centrischen Bohrungen zweier Schrauben geführt sind, welche in Muttergewinden des Ambosses sitzen. Oben an der Console sind die beiden Drähte an einem drehbaren Bolzen befestigt, durch welchen die Spannung so weit getrieben werden kann, als es das

Gewicht des ca. 150 kg schweren Ambosses beziehungsweise die Festigkeit der Console zulässt. Man bringt die Drähte dadurch gerade, und ihre Spannung ist so gross, dass sie klingen.

Der Abstand dieser Drähte beträgt ca. 85 mm, und an denselben ist der Schlagklotz mit rinnenartigen Führungen geführt, deren Verticalabstand 225 mm beträgt.

Auch hier wird das Fallenlassen durch Abbrennen der Schnur vermittelt, und die Bestimmung des activen Gewichtes findet in der oben angegebenen Weise statt.

Auch bei dem S. 53 besprochenen Versuche, welcher unter dem Dampfhammer stattfand, wurde das active Gewicht desselben ermittelt und zwar in der Weise, dass der Hammer einmal durch entsprechende Gewichte zu langsamem Hub gebracht wurde und dann so lange Gewichte entfernt wurden, bis ein langsames Sinken eintrat. Bei letzterem findet man das active Gewicht gleich der mit 10 multiplicirten Belastung der verwendeten Decimalwage.

In Bezug auf den Schlagversuch, welcher mit der grossen 5,5 kg schweren Gusseisenkugel (s. Tabelle S. 57) ausgeführt wurde, mag hier bemerkt werden, dass eine jener Birnen, wie sie zum Zerschlagen von Altgusseisen in Verwendung stehen, benutzt wurde. Die Kugel wurde auf einem genügend grossen Gusseisenblock aufgestellt und zwar der Ort derselben durch Herabsenkeln von der Unterfläche der gehobenen Birne aus bestimmt. Die Birne hing hierbei an einer Hanfschnur, welche von geschütztem Standorte aus mittels einer glühenden Eisenstange abgebrannt wurde.

**2. Dynamometrische Presse.** Diese Presse, versehen mit Dynamometerfeder und einem durch dieselbe bewegten Zeiger, wurde auf Bestellung von W. Kraft in Wien, die zusätzlichen späteren Vorrichtungen, wie jene zum Schneiden und Lochen, von F. J. Müller in Bubna bei Prag gebaut. Fig. 1 und 2, Taf. III stellt diesen Apparat in zwei Ansichten dar, aus welchen die Einrichtung zu entnehmen ist. *K* ist die die Schraube *S* bethätigende Kurbel, *I*, *II* sind die beiden Schlitten, zwischen welchen sich die Dynamometerfeder *F* befindet. Der Schlitten *II* ist durch die langen, etwas federnden Gleitschienen *II'* gleichsam verlängert und dadurch der ruhige Gang desselben befördert, beziehungsweise das Ecken desselben vermindert. Durch Drehung der Kurbel *K*, beziehungsweise der Schraube *S*, wird der Schlitten *II* niederbewegt, und der Druck, mit welchem dies geschieht, lässt sich, indem er eine Deformation der Feder *F* und eine Ortsveränderung des Zeigers bewirkt, am getheilten Kreise ablesen. Die Bestimmung des vom Schlitten *II* zurückgelegten Weges erfolgt durch Ablesung desselben am Massstabe *m*; zu diesem Zwecke ist dieser Massstab fest, wenn auch einstellbar, am Gestelle der Maschine befestigt. Mit dem Schlitten ist an einem drehbaren Arme ein Nonius verbunden, welcher sich längs des Massstabes hin-

bewegt. Die auf die Gleitschienen *II'* wirkenden Schrauben gestatten durch entsprechendes Anziehen derselben eine Regulirung der Führung des Schlittens, dessen Bewegungswiderstand sich beim Leergange gleichfalls an der Theilscheibe ablesen lässt.

Der Schlitten *II* kann entweder mit der Kolbenstange eines Presskolbens oder mit irgend einem anderen, passend wirkenden Werkzeuge verbunden werden, je nachdem es die Art der vorzunehmenden Versuche erheischt. Unsere Figuren stellen jene Montirung dar, welche beim Schneiden von Blech zur Anwendung kam, und die Einrichtung ist wohl ohne weiteres aus denselben zu entnehmen; demnach wird die Bemerkung genügen, dass zur Uebertragung des Druckes zwischen den Schlitten *II* und den Schlitten des oberen Scheerbackens ein auf letzteren Schlitten centrisch zur Scheerfläche aufgesetzter kleiner Stahlcylinder verwendet wurde. Um zu Lochungsversuchen überzugehen, ist nur eine Auswechslung weniger Theile erforderlich. Will man jedoch Versuche über den Ausfluss aus Bodenöffnungen von Gefässen durchführen, so müssen die Theile *A*, *B*, *C* durch andere ersetzt werden.

Mit diesem Apparate konnten Pressungen bis 150 kg gegeben werden. In constructiver Beziehung ist an demselben die Kürze der Führung des Schlittens *I* auszusetzen; es wäre bei Neuherstellung eines solchen Apparates dieselbe etwa dreimal so lang zu wählen, da hierdurch der Gang ruhiger wird, wenn auch die Widerstände dieses Schlittens ganz unwesentlich sind und nur auf die von der Schraube *S* zu leistende Arbeit Einfluss nehmen. Die leicht abzulesenden Angaben dieses Apparates liefern die Daten zur Construction des Arbeitsdiagramms. Ein zweiter, ähnlicher Apparat in horizontaler Anordnung ist mit einer Indicatoreinrichtung combinirt, welche das Arbeitsdiagramm selbstthätig verzeichnet; für die meisten Versuche erwies sich jedoch der beschriebene Apparat als geeigneter, da an ihm die Anpassung für den speciellen Bedarf leichter durchzuführen war.

Die Festigkeitsmaschine Prof. Gollner's ist in den Technischen Blättern 1883, S. 7 und 173, ausführlich beschrieben.

# Register.


A.

Seite

Abscheeren . . . . . 21
Abscheerungswiderstand . . . . 62
Abtrennen von Spänen . . . . . 17
Arbeitswiderstände verschiedenen Materials . . . . . 79
Auspressen weicher Massen . . . 31

B.

Ballistisches Schlagwerk . . . . 101
Barba's Aehnlichkeitsgesetz . . 12, 51
Bauschinger . . . . . 48
Berstungsfestigkeit . . . . . 11, 67
Beziehungen von Druck und Stoss . 96
Biegung von Stäben . . . . . 13
Blass, E. . . . . 69
Blei, eigenthümliches Verhalten des 87
Blei, Volumänderungen . . . . . 81
Bohren . . . . . 21
Brucharbeit . . . . . 5
Bruchfactor . . . . . 5, 56, 60
Bruchhöhe . . . . . 6, 58, 60

C.

Callon (s. Sprengen) . . . . . 10
Chronograph von Hipp . . . . . 103
Chronoskop . . . . . 105
Constanz des Volumens . . . . . 81

D.

Dampfhammer . . . . . 25
Deformation von Flüssigkeiten . . 73
Dichtenänderungen . . . . . 81
Draht, Zugfestigkeit . . . . . 80
Drahtziehen . . . . . 27
Drehen (Abtrennen von Spänen) . 17
Druck und Stoss, Beziehungen von . 87
Druckfestigkeit . . . . . 12, 48
Druckproben mit geknetetem Brode 45
Druckproben mit Blei . . . . . 78
Druckproben mit Kupfercylindern 3, 47
Druckproben mit Thon . . . . . 43
Druckversuch mit Kautschuk . . . 86

Seite

Druckversuche mit Kupfercylindern gleichen Volumens . . . . . 88
Dynamometrische Presse . . . . 115

E.

Ecken . . . . . 67

F.

Fallhöhe, Einfluss der . . . . . 90
Fink . . . . . 15
Fischer, Hugo . . . . . 80
Fliessen fester Körper . . . . . 75
Fliessen spröder Körper . . . . . 75
Flüssigkeiten . . . . . 73
Fräsen . . . . . 21

G.

Gase, elastische Deformation der . 73
Gauthey . . . . . 48
Geschwindigkeitseinfluss . . . . . 87
Geschwindigkeit zum Zerschleudern . 7
Guttapercha . . . . . 85, 95

H.

Hartig . . . . . 65
Haswell, R. L. . . . . 97
Heim . . . . . 76
Hobeln . . . . . 17
Höfer (s. Sprengen) . . . . . 10, 15

K.

Kautschuk, Volumänderungen . . . 85
Keller . . . . . 64
Knickungsfestigkeit . . . . . 14
Kupfer, Schlagproben mit . . . . 108
Kupfer, Volumänderungen . . . . 85

L.

Lamé . . . . . 69
Lebasteur . . . . . 51
Lebrun (s. Sprengen) . . . . . 10
Lochen . . . . . 21, 24, 61
Lochen von Platten . . . . . 24
Lochmeisseln . . . . . 21

M.

| | Seite |
|---|---|
| Marié | 51 |
| Material, dessen Vorbereitung | 40 |
| Meisselbohren | 21 |
| Minenherd (s. Sprengen) | 8 |
| Mohr | 77 |

P.

| | |
|---|---|
| Panzerplatten | 26 |
| Perronnet | 48 |
| Polak | 42 |
| Prägwerke | 26 |
| Presse, dynamometrische | 115 |
| Pressen | 26, 31 |
| Prückner, Arm. | 101 |
| Pulverisiren | 11 |
| Pulversack (s. Sprengen) | 8 |

R.

| | |
|---|---|
| Redtenbacher | 41 |
| Reibung, innere | 35 |
| Reibungsarbeit | 70 |
| Rittinger | 14 |
| Röhren unter äusserem oder innerem Druck | 11 |
| Rondelet | 48 |
| Ruckweise Inanspruchnahme | 113 |

S.

| | |
|---|---|
| Sanddruck-Versuche | 71 |
| Scheerwiderstand | 62 |
| Schläge, Einfluss vieler und schwacher | 92 |
| Schlagarbeit, Bestimmung der | 91 |
| Schlagdauer | 104 |
| Schlaggeschwindigkeiten, Einfluss der | 90 |
| Schlagproben m. Kupfercylindern unter dem ballistischen Schlagwerk | 108 |
| Schlagproben mit Thoncylindern unter dem ballistischen Schlagwerk | 111 |
| Schlagversuche mit Kugeln | 56 |
| Schlagversuche mit Kupfercylindern | 52, 88 |
| Schlagwerk, ballistisches | 101 |
| Schlagwerke | 114 |
| Schmieden | 25 |
| Schneiden von Blech | 22, 62 |
| Schneiden mit Scheeren | 21, 62 |
| Schneidwiderstand | 62 |
| Soufflot | 48 |
| Sprengen | 8 |
| Sprengen durch Wasserdruck | 67 |
| Spring | 77 |
| Steiner | 35, 72 |

T.

| | |
|---|---|
| Technologisches Experiment | 38, 42 |
| Thime | 19 |
| Thon, Schlagproben mit | 111 |
| Torsion | 13 |
| Treska | 39, 75 |

U.

| | |
|---|---|
| Uchatius | 91, 96 |

V.

| | |
|---|---|
| Vavra | 66 |
| Vicat's Aehnlichkeitsgesetz | 13, 48 |
| Volumsänderungen | 81 |
| Vorgabe (s. Sprengen) | 8 |

W.

| | |
|---|---|
| Waltenhofen, Adalb. v. | 103 |
| Walzen | 27, 69 |
| Werkzeugmaschinen | 26 |
| Widerstände congruenter Probestücke verschiedenen Materials | 78 |
| Wurfkegel (s. Sprengen) | 8 |

Z.

| | |
|---|---|
| Zeit, Einfluss der | 87 |
| Zerschlagen | 7, 14 |
| Zerschlagen von Glascylindern | 59 |
| Zerschlagen von Kugeln | 56 |
| Zerschleudern | 7, 14, 58 |
| Zerstampfen | 14 |
| Ziehungswiderstand | 27 |
| Zugfestigkeit | 12, 51, 80 |
| Zugfestigkeit für Stoss | 91 |
| Zugversuch mit Kautschuk | 86 |
| Zugversuche mit Stahl | 52 |


Druck von A. Th. Engelhardt in Leipzig.

Fig. 1.

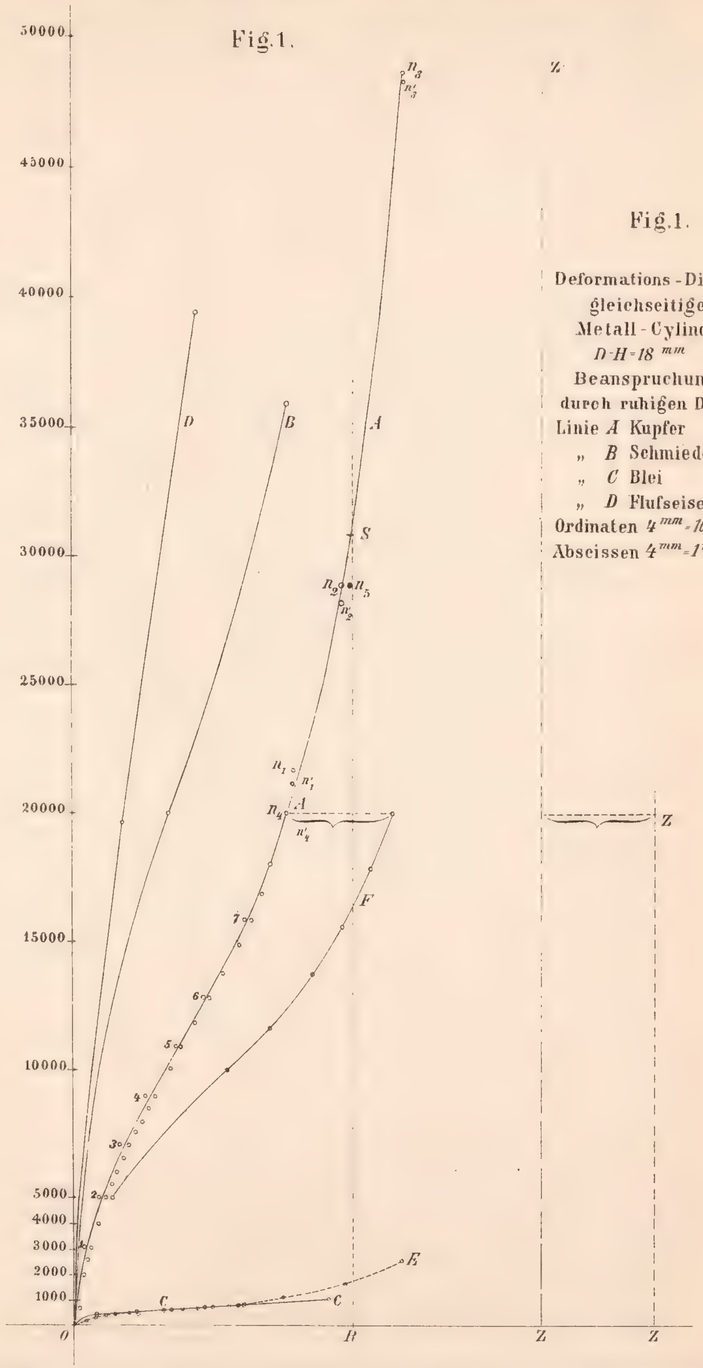
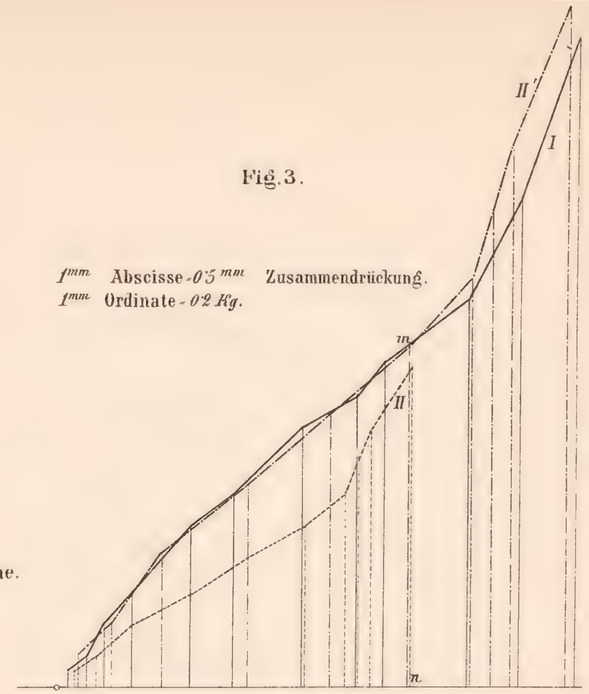



Fig. 1.

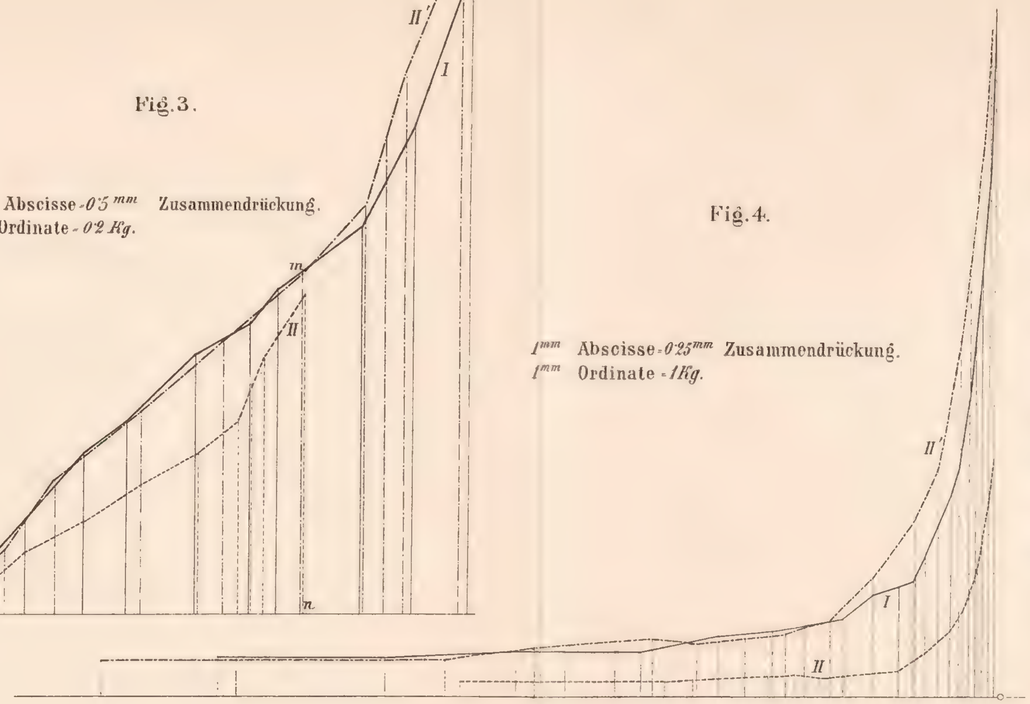
Deformations-Diagramm
gleichseitiger
Metall-Cylinder
$D = H = 18^{mm}$
Beanspruchung
durch ruhigen Druck
Linie *A* Kupfer
„ *B* Schmiedeisen
„ *C* Blei
„ *D* Flufseisen
Ordinaten $4^{mm} = 1000^{K.}$
Abscissen $4^{mm} = 1^{mm}$ Höhenabnahme.

Fig. 3.




$1^{mm}$ Abscisse $= 0{\cdot}5^{mm}$ Zusammendrückung.
$1^{mm}$ Ordinate $= 0{\cdot}2\,Kg.$

Fig. 4.




$1^{mm}$ Abscisse $= 0{\cdot}25^{mm}$ Zusammendrückung.
$1^{mm}$ Ordinate $= 1\,Kg.$

Ausflufs
plastischer Massen
aus den
Bodenöffnungen
von Gefäfsen.

Fig. 6.

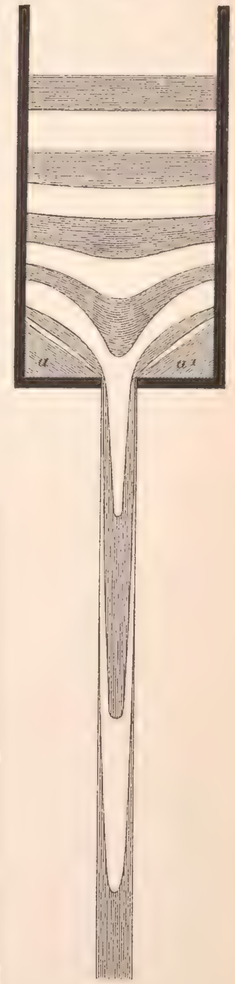
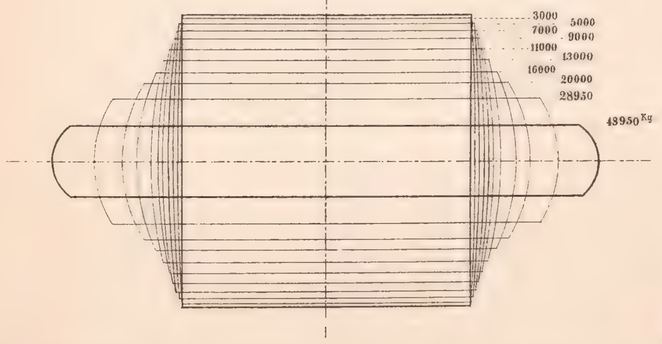



Fig. 2.

Deformationsstufen jenes
gleichseitigen Kupfercylinders in
2½ facher nat. Grösse
welcher das Diagramm *A* Fig. 1. ergab.
$h - d \mid 18^{mm}$



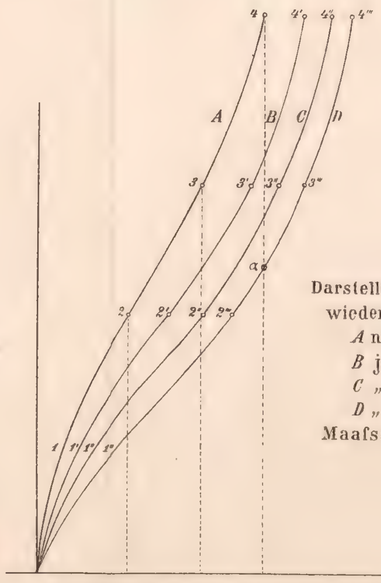




Fig. 5

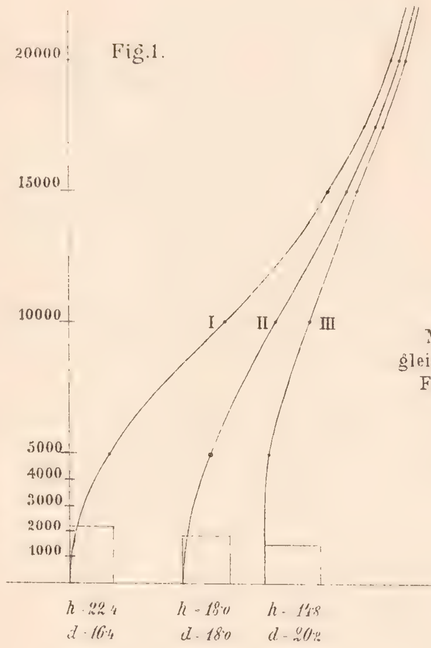
Darstellung des Einflusses
wiederholten Ausglühens
*A* nicht geglüht
*B* je 1 mal geglüht
*C* „ 2 „ „ „
*D* „ 3 „ „ „
Maafsstab wie in Fig. 1.

Verlag von Arthur Felix in Leipzig.

Lith. Anst. v. C. Kirst, Leipzig

Diagramme von Druckversuchen mit Kupfercylindern **gleichen Volumens**, aber verschiedener Abmessungen.

Fig.1.

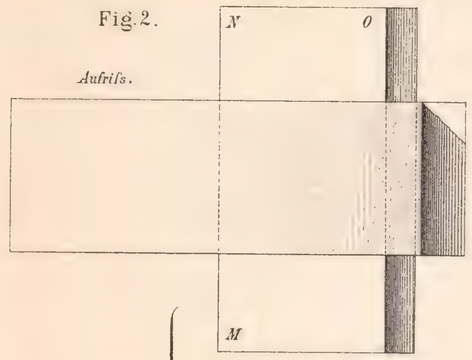



Maafsstab gleich jenem in Fig.1 Taf.I.

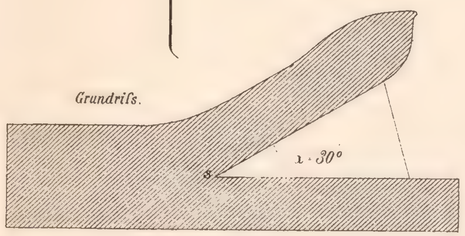
Verschiebung der Schichten beim Walzen.

Fig.2 bis 6. Abtrennen von Spänen bei verschiedenem Schneid- u. Aufsetz-Winkel des Werkzeuges.

Fig.2.




Schneidwinkel $\alpha = 30°$
Aufsetzwinkel $\beta = 90°$



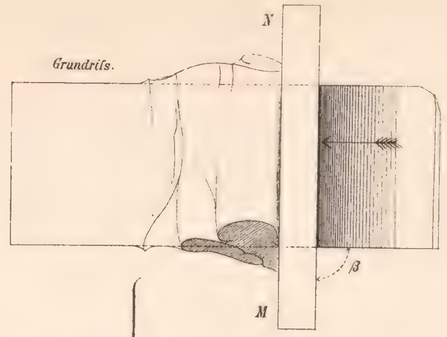
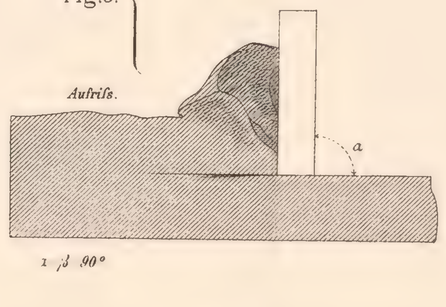




Fig.3.



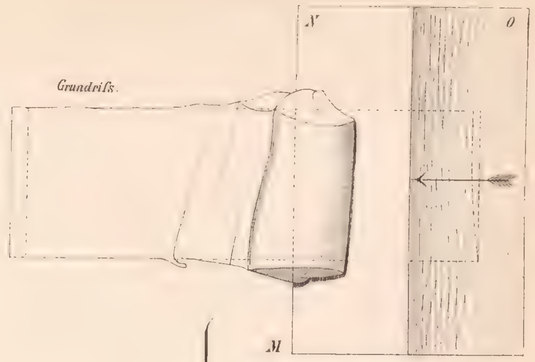
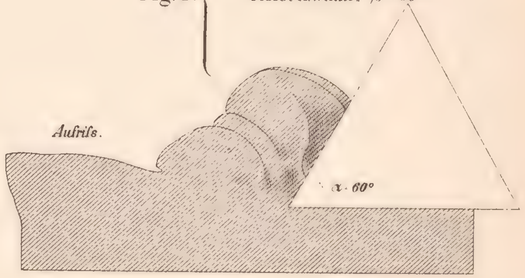
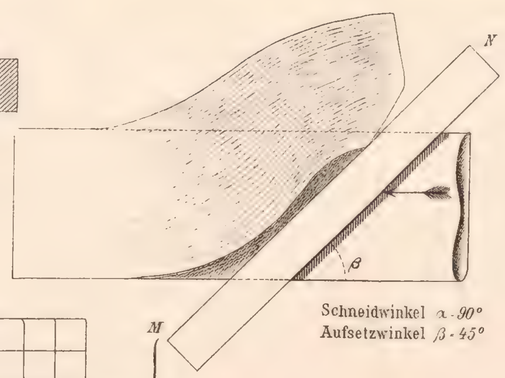




Fig.4.

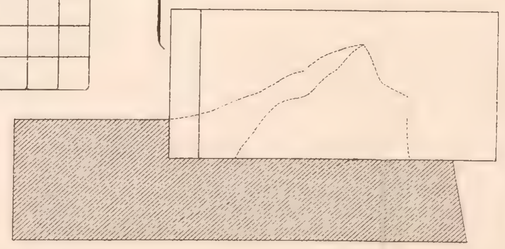
Schneidwinkel $\alpha = 60°$
Aufsetzwinkel $\beta = 90°$




Schneidwinkel $\alpha = 90°$
Aufsetzwinkel $\beta = 45°$

Fig.5.



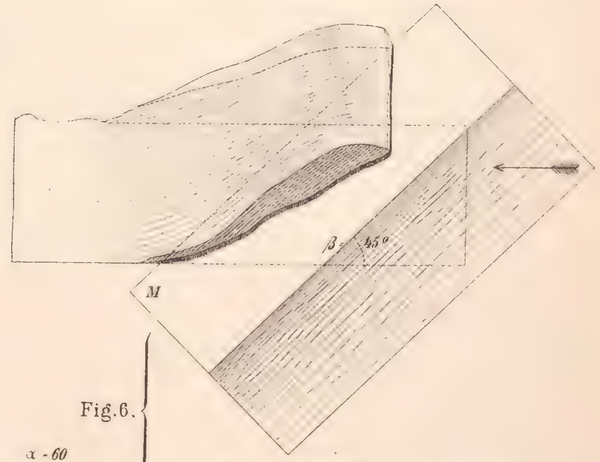



Fig.6.

α - 60
β - 45

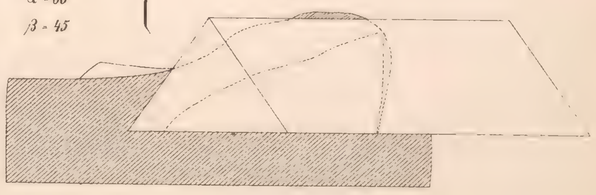


Fig.7 b.

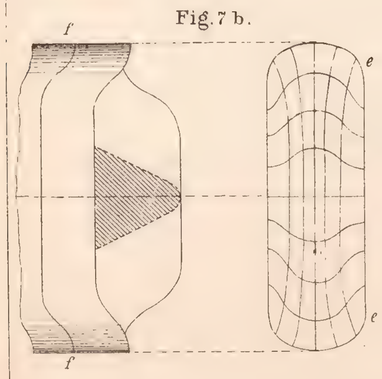
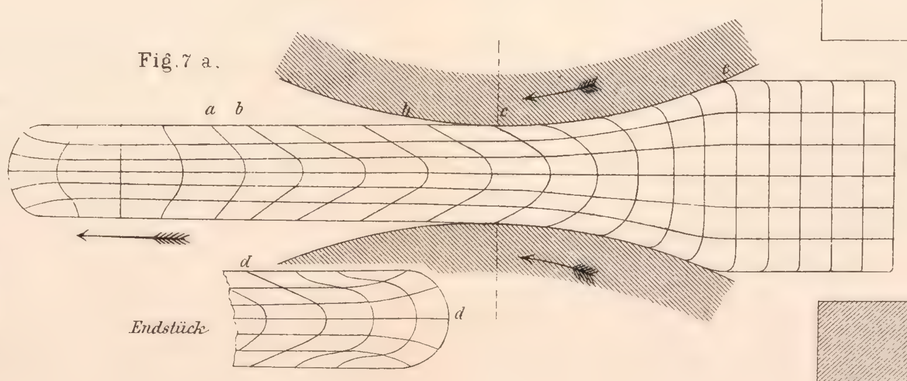


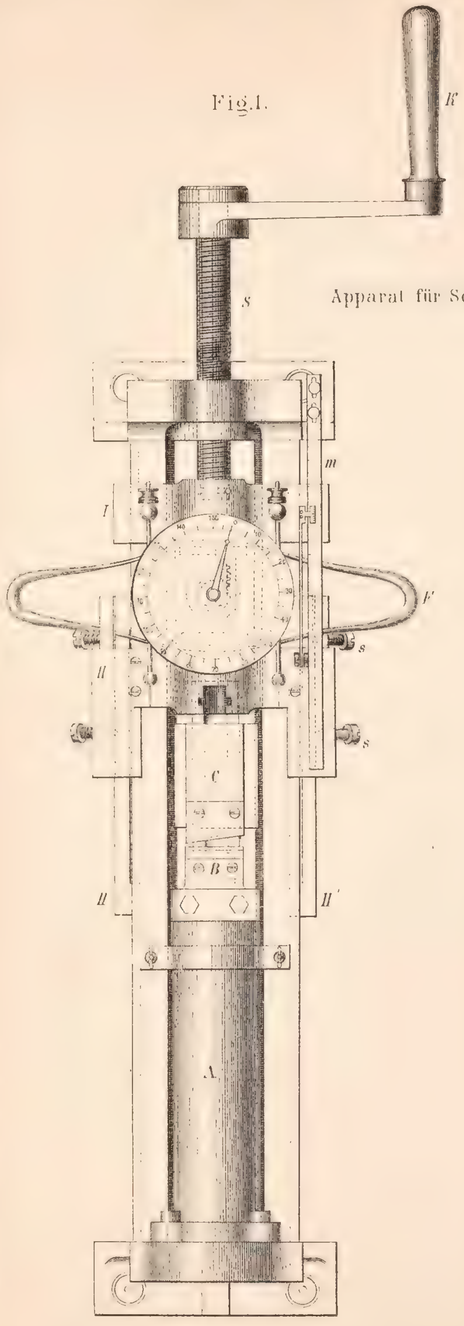

Fig.7 a.




Verlag von Arthur Felix in Leipzig.

Lith. Anst. v. C. Kirst, Leipzig.

Fig. 1.




Apparat für Scher-u. Lochproben etc.

Fig. 2.

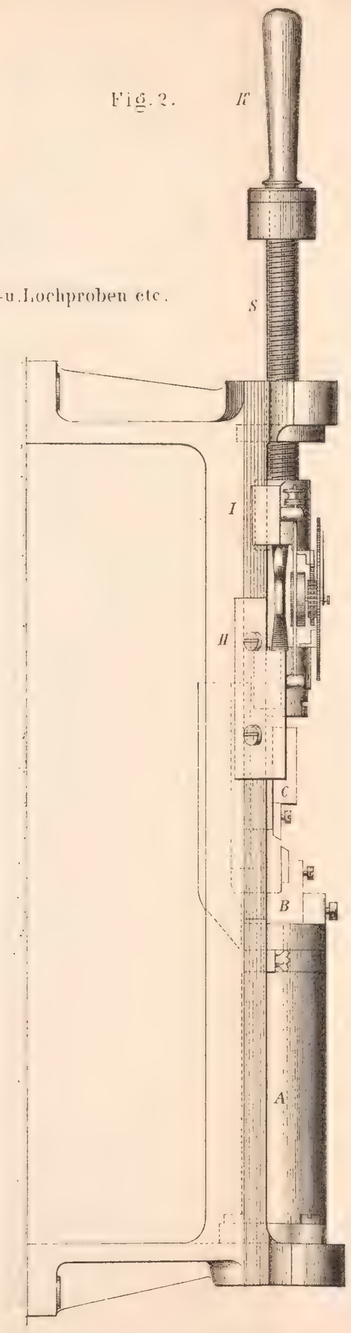
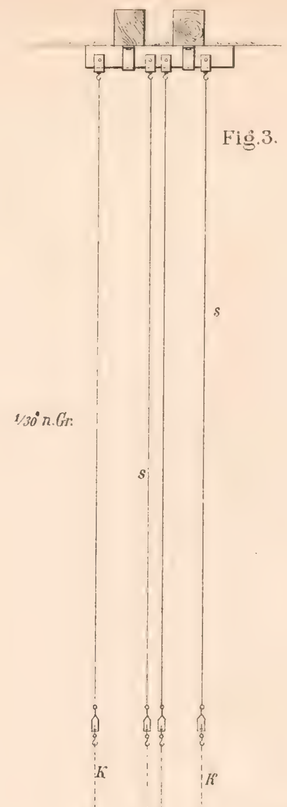



Fig. 3.




Ballistisches Schlagwerk

1/30 nat. Grösse.

Fig. 4.

Fig 5

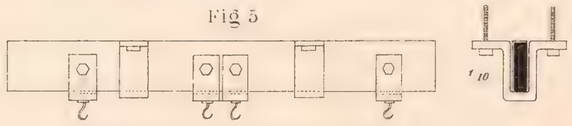
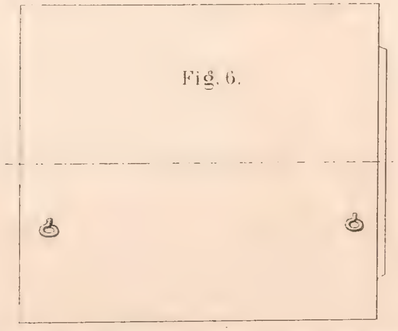


Fig. 6.



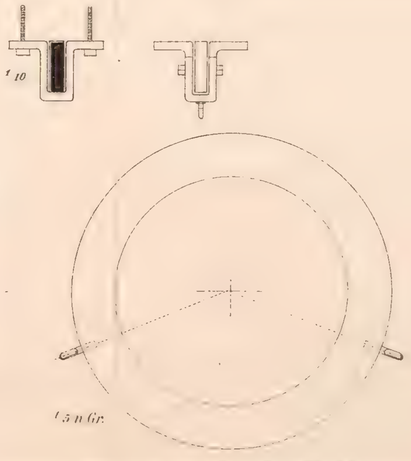
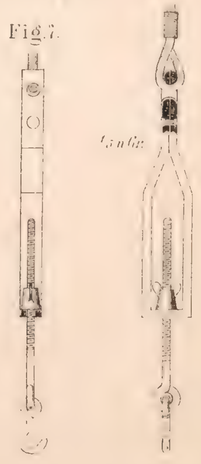



Fig. 7.




Verlag von Arthur Felix in Leipzig.

Lith. Anst. v. C. Hirst, Leipzig.

Ludwig Kilger
Buchbinder
MÜNCHEN.

BSB Bayerische StaatsBibliothek

MDZ Münchener DigitalisierungsZentrum Digitale Bibliothek

Kick, Friedrich,

Das Gesetz der proportionalen Widerstände und seine Anwendungen nebst Versuchen über das Verhalten verschiedener Materialien bei gleichen Formänderungen sowohl unter der Presse als dem Schlagwerk

Leipzig 1885

Math.a. 127 In
urn:nbn:de:bvb:12-bsb11650346-5